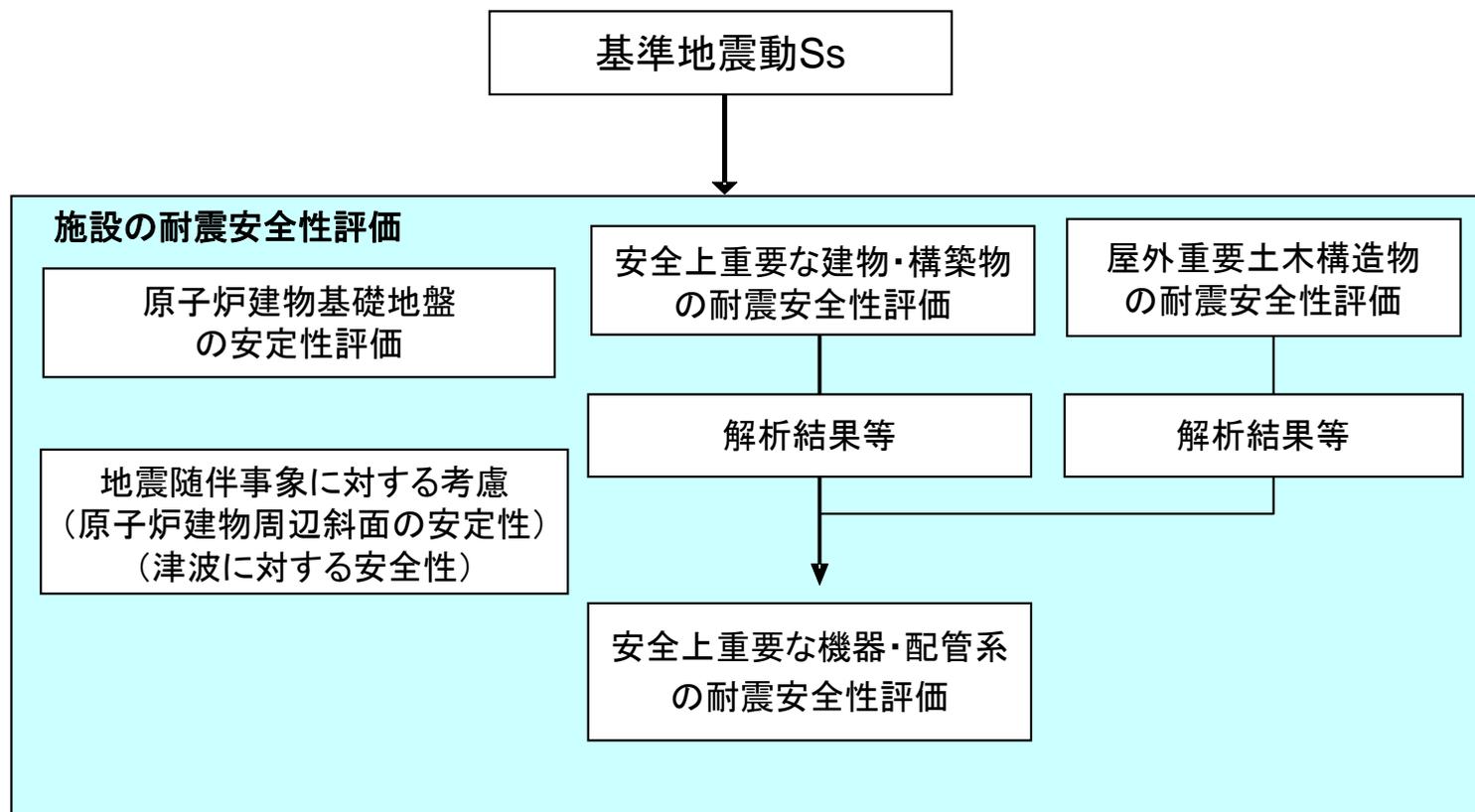


**新耐震指針に照らした耐震安全性評価
主要施設の耐震安全性
(もんじゅ)**

平成21年12月21日

独立行政法人日本原子力研究開発機構

1. 新耐震指針に照らした耐震安全性評価の流れ
2. 施設の耐震安全性評価方針
3. 主要施設の評価方法
4. 安全上重要な主要施設の耐震安全性評価
5. まとめ



注:本資料では安全上重要な主要施設の耐震安全性評価結果についてご説明

1. 評価方針

- ・新耐震指針に照らした地質・地盤調査結果に基づき策定した基準地震動 S_s に対し、安全上重要な施設の安全機能の保持の観点から評価を実施
- ・評価に用いる地震応答解析モデル、評価基準値等は、従来の評価実績、規格・基準等および最新の知見を考慮

2. 評価対象

- ・安全上重要な機能を有する施設
- ・ナトリウムを内包する主要な設備等
(評価箇所は機器が約100機種、配管が約240ライン)

3. 評価方法

建物・構築物(①)

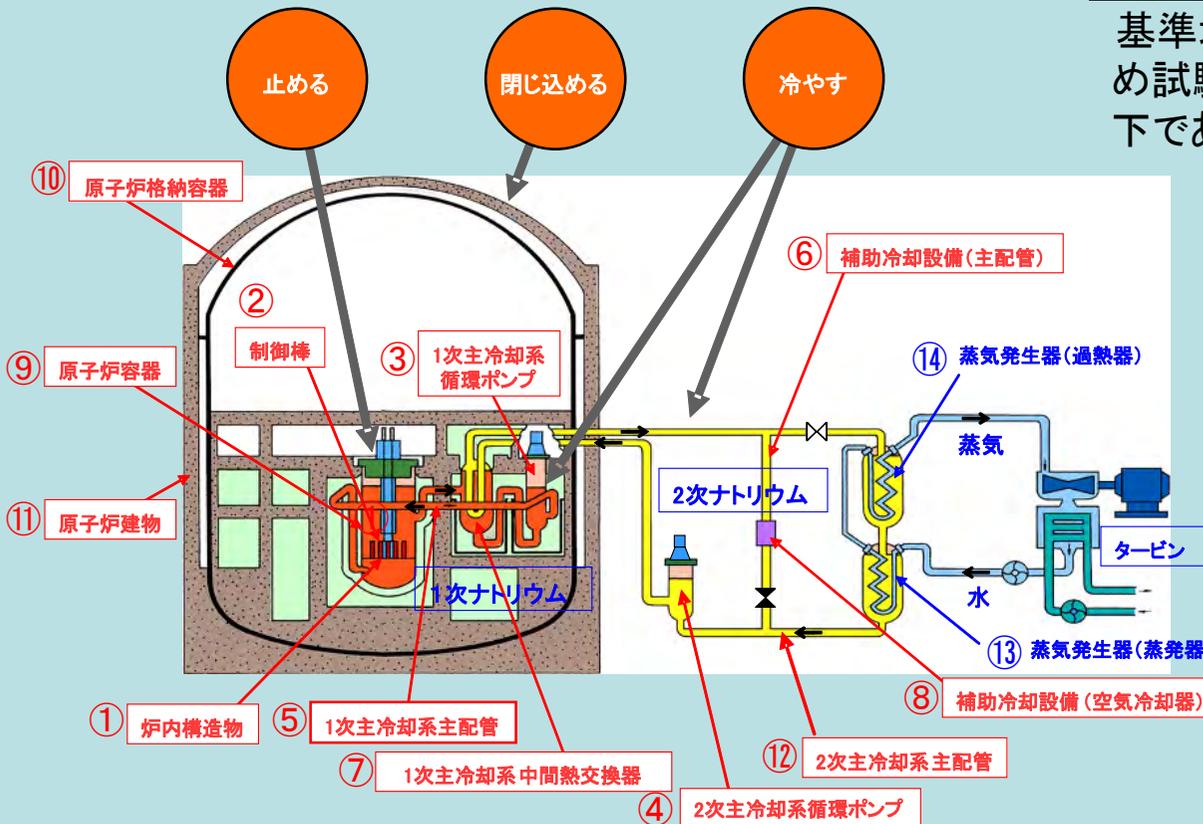
基準地震動 S_s による時刻歴応答解析により求めた耐震壁の最大応答せん断ひずみと評価基準値を比較

機器・配管系の構造強度(①③④⑤⑥⑦⑧⑨⑩⑫⑬⑭)

基準地震動 S_s を想定した場合に施設に生じる応力(発生値)を算出し、評価基準値(材料毎に定められた許容応力)と比較

機器・配管系の動的機能維持(②:制御棒挿入性)

基準地震動 S_s による設備の変位、応答加速度等が、予め試験等により動作の機能が確認された評価基準値以下であることを確認



主な評価対象施設

止める

① 炉内構築物

② 制御棒

冷やす

③ 1次主冷却系循環ポンプ

④ 2次主冷却系循環ポンプ

⑤ 1次主冷却系主配管

⑥ 補助冷却設備主配管

⑦ 1次主冷却系中間熱交換器

⑧ 補助冷却設備空気冷却器

閉じ込める

⑨ 原子炉容器

⑩ 原子炉格納容器

⑪ 原子炉建物・原子炉補助建物

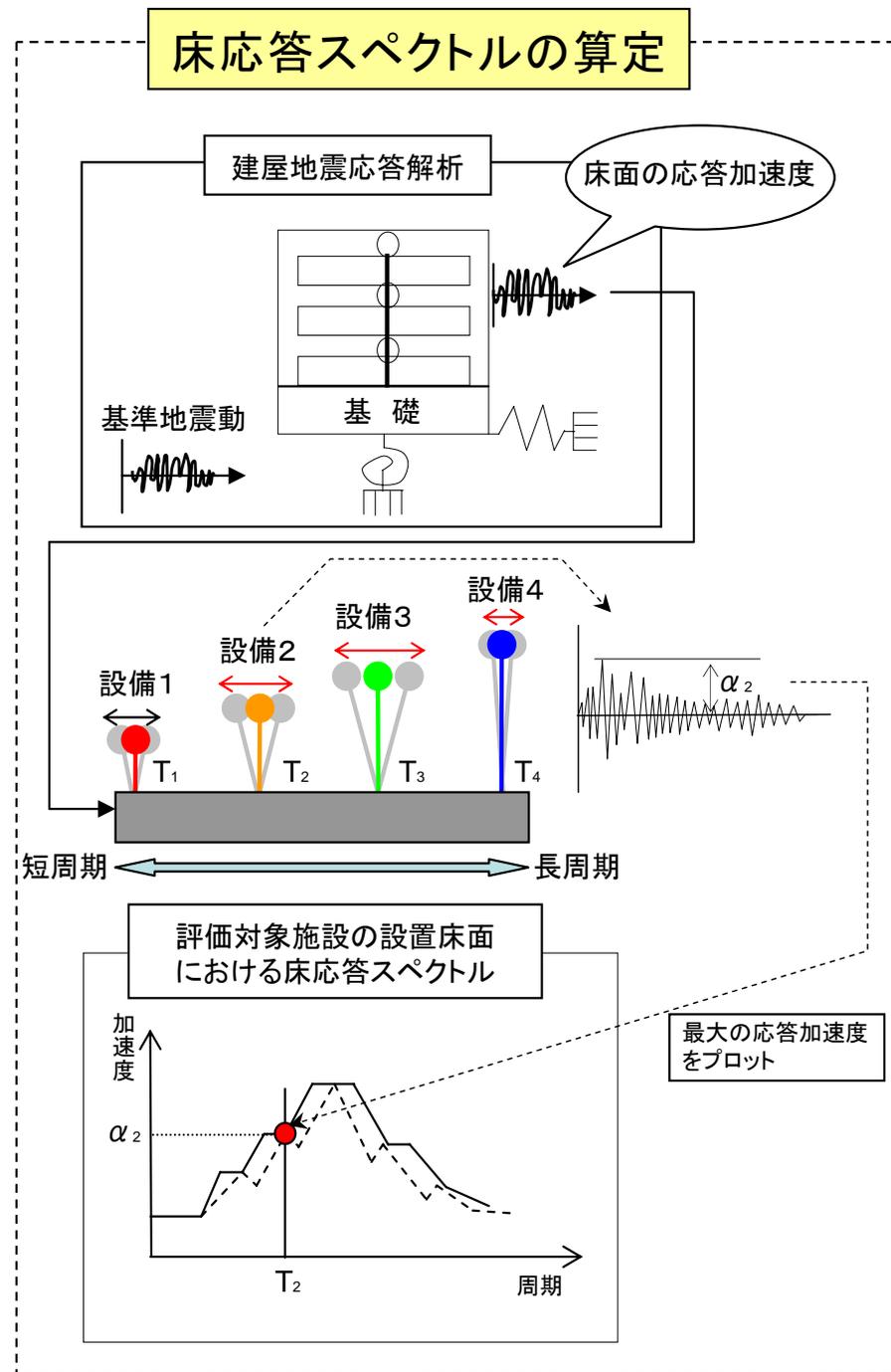
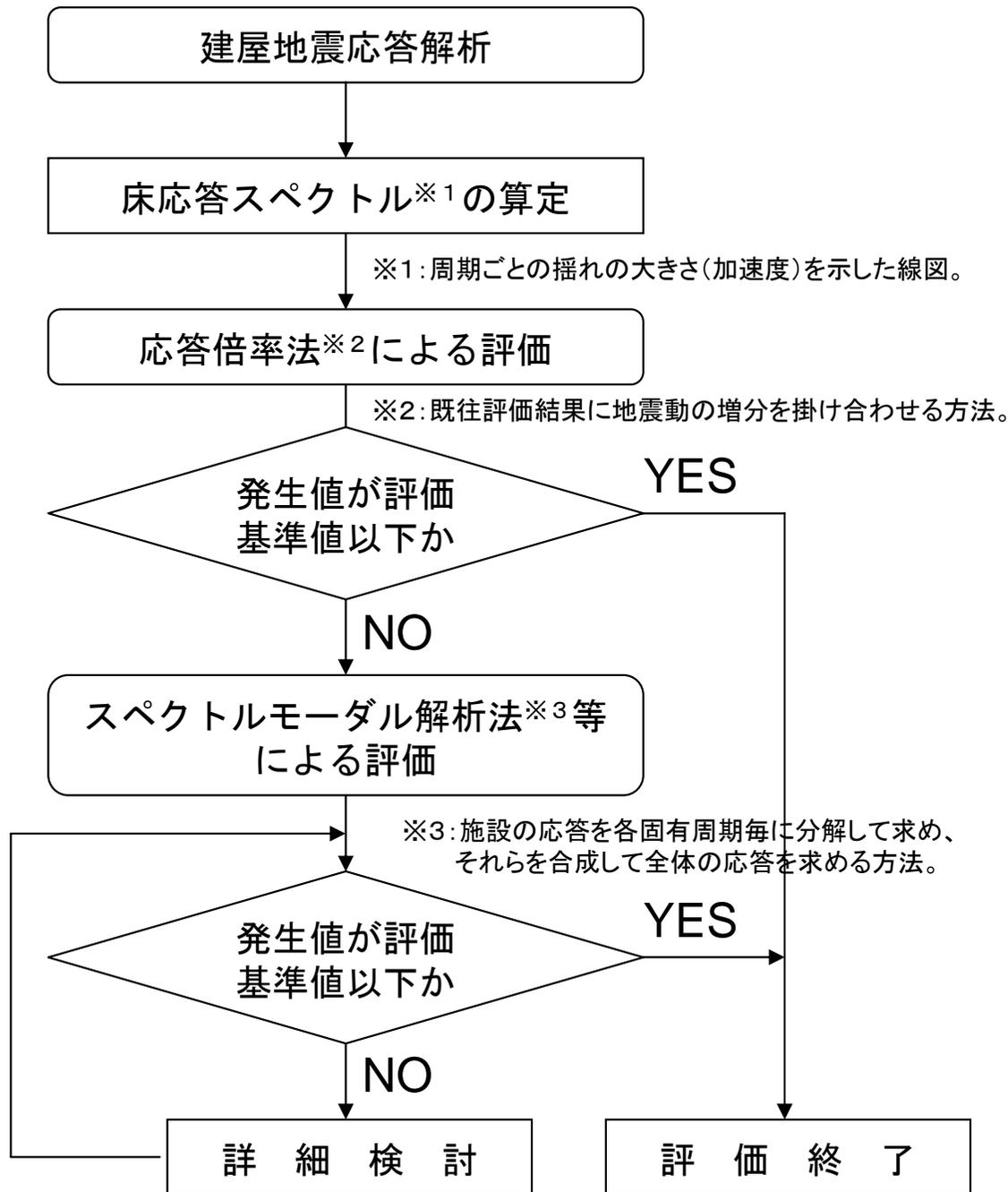
主なナトリウム内包設備

⑫ 2次主冷却系主配管

⑬ 蒸気発生器(蒸発器)

⑭ 蒸気発生器(過熱器)

<もんじゅにおける評価の流れ>



応答倍率法による評価

応答倍率法による発生値の算定は、原設計(既往評価等)での評価方法に応じて、以下の方法にて評価

■ 応答倍率法による評価1

$$\text{基準地震動}S_s\text{による発生値} = \left[\begin{array}{l} \text{原設計の応力等} \\ \text{(地震以外の応力、荷重)} \end{array} + \begin{array}{l} \text{原設計の応力等} \\ \text{(地震の応力、荷重)} \end{array} \right] \times \text{応答比}A1 *$$

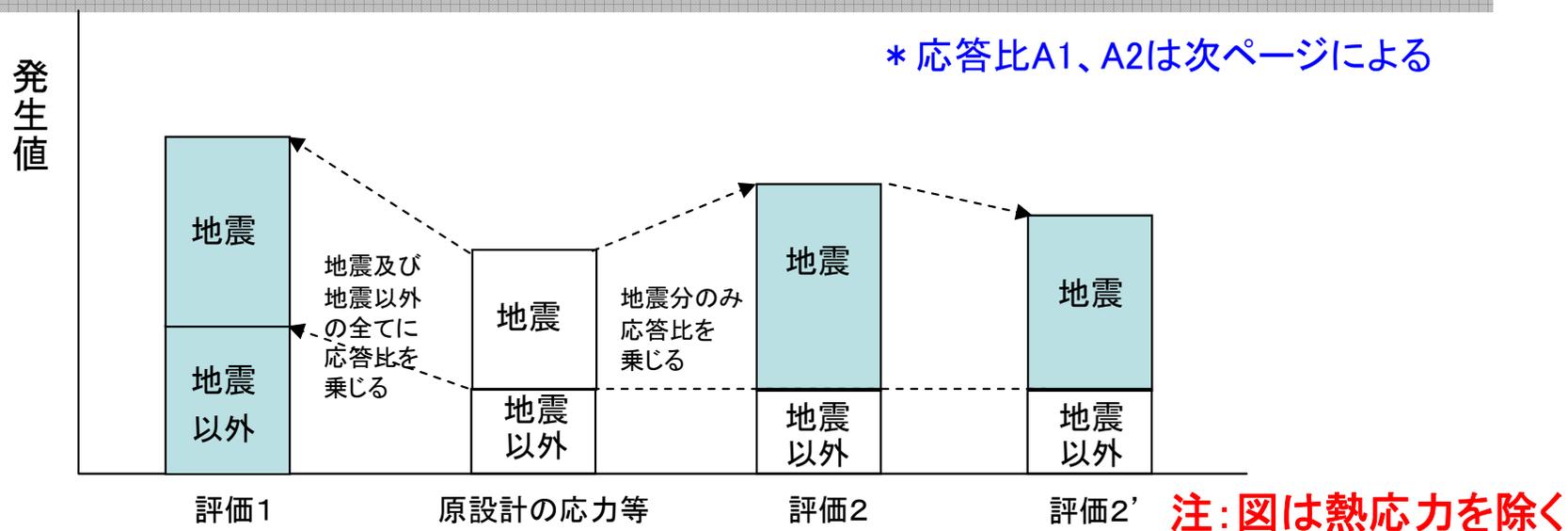
■ 応答倍率法による評価2

$$\text{基準地震動}S_s\text{による発生値} = \begin{array}{l} \text{原設計の応力等} \\ \text{(地震以外の応力、荷重)} \end{array} + \begin{array}{l} \text{原設計の応力等} \\ \text{(地震の応力、荷重)} \end{array} \times \text{応答比}A2 *$$

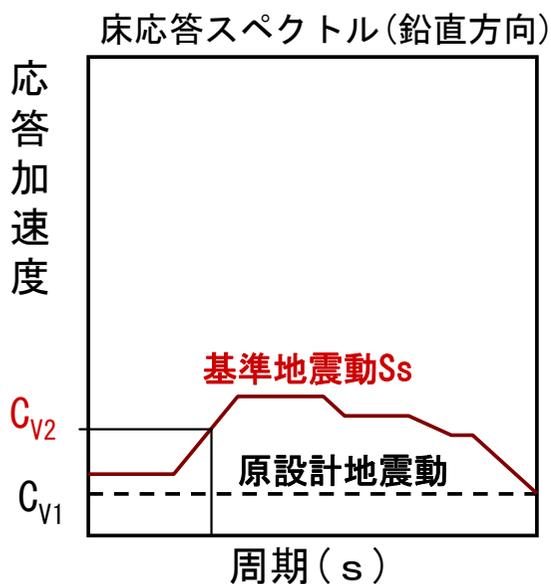
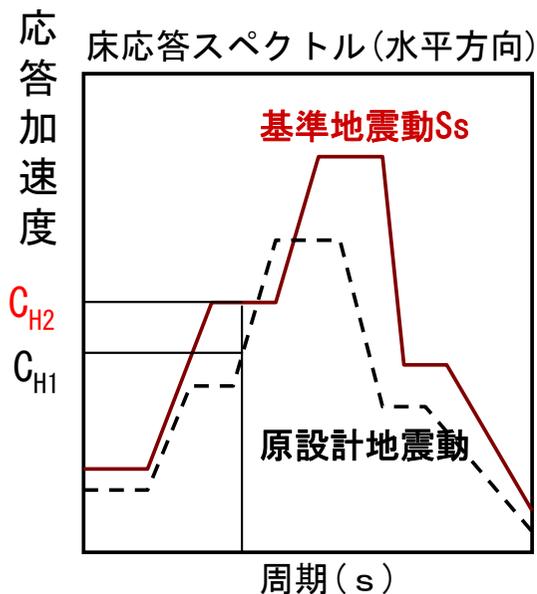
評価2 → 地震以外の応力等 + 水平方向地震による応力等 + 鉛直方向地震による応力等

評価2' → 地震以外の応力等 + $\sqrt{\text{水平方向地震による応力等}^2 + \text{鉛直方向地震による応力等}^2}$

地震以外の応力、荷重 = 自重、内圧等



応答倍率法による評価



【応答比】

■ 応答比A1 = $\frac{\text{基準地震動Ssによる応答(合成)}}{\text{原設計の応答(合成)}}$

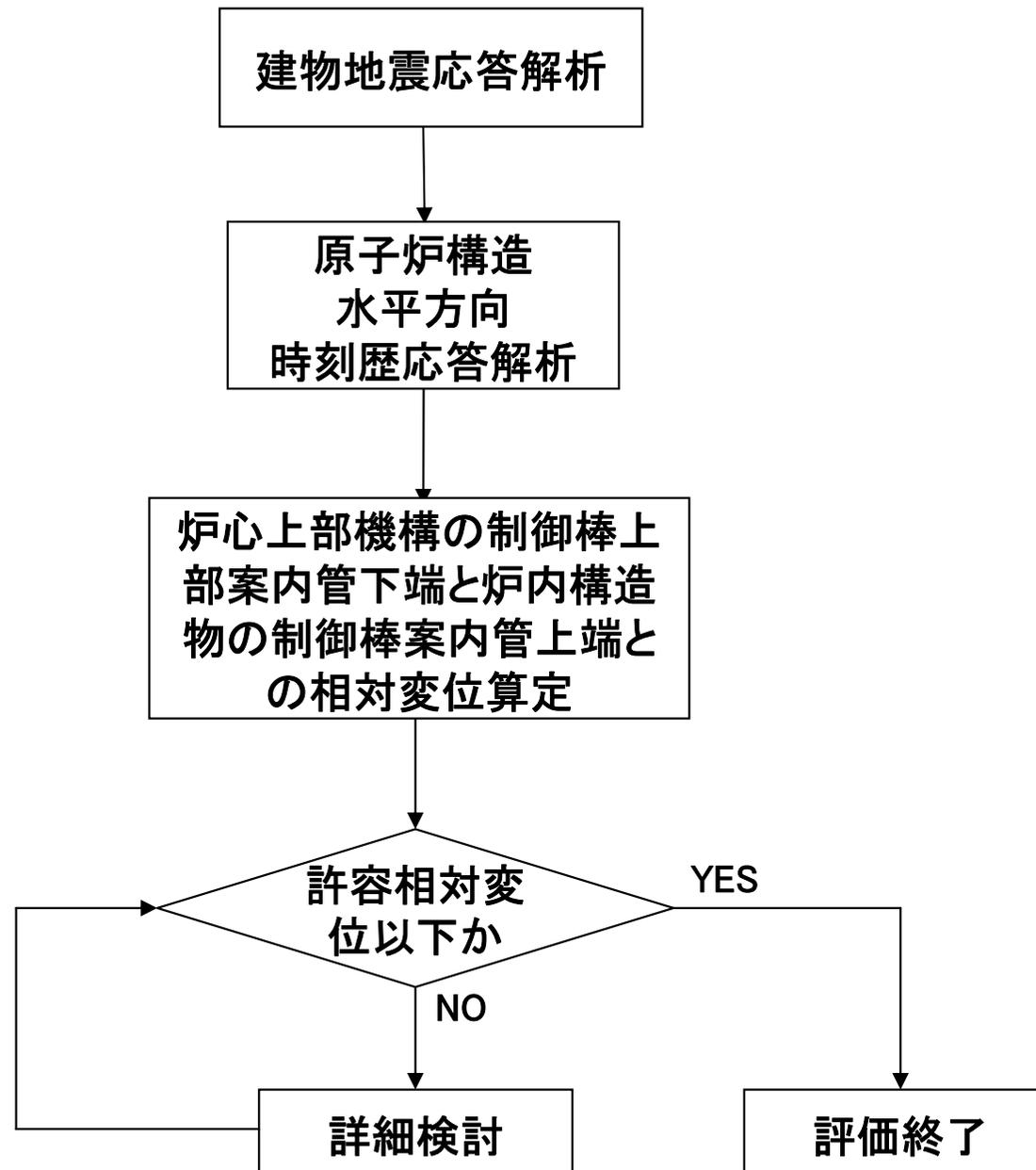
$$= \frac{\sqrt{C_{H2}^2 + (1 + C_{V2})^2}}{\sqrt{C_{H1}^2 + (1 + C_{V1})^2}}$$

■ 応答比A2 = $\frac{\text{基準地震動Ssによる応答}}{\text{原設計の応答}}$

$$= \frac{C_{H2}}{C_{H1}} \quad (\text{水平方向})$$

$$= \frac{C_{V2}}{C_{V1}} \quad (\text{鉛直方向})$$

動的機能維持(制御棒挿入性)の評価方法



4. 安全上重要な主要施設の耐震安全性評価

I. 原子炉建物・原子炉補助建物

II. 原子炉容器及び炉内構造物

III. 1次主冷却系配管

IV. 原子炉格納容器

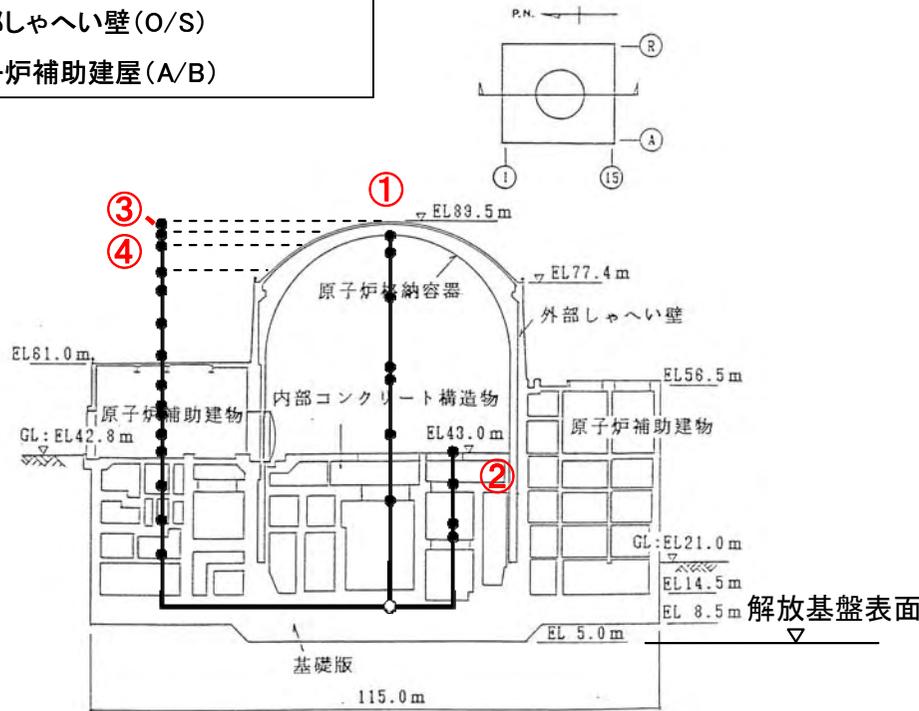
V. 蒸気発生器(蒸発器)

VI. 制御棒挿入性

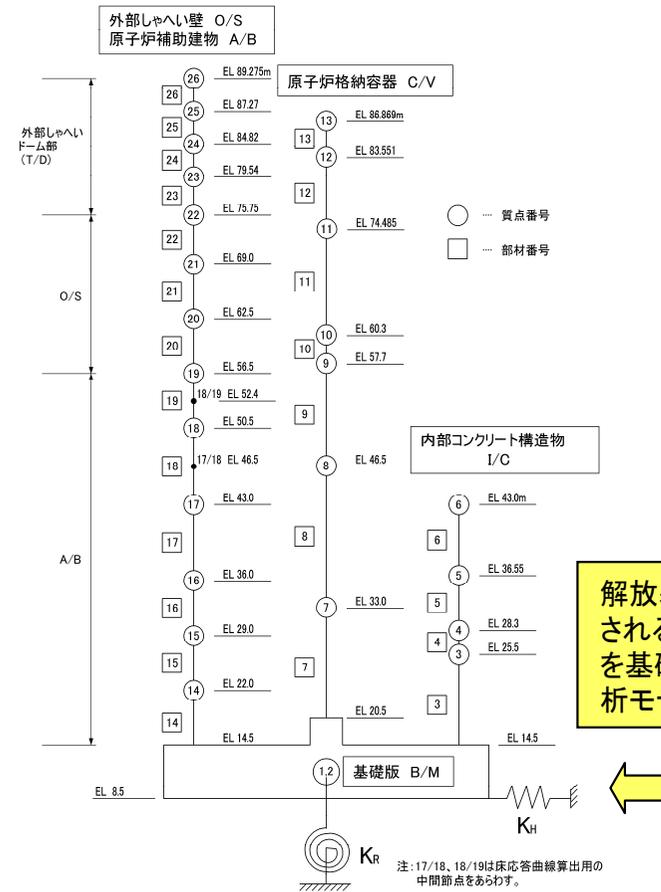
VII. 安全上重要な主要施設の耐震安全性評価一覧

【凡例】

- ①原子炉格納容器(C/V)
- ②内部コンクリート構造物(I/C)
- ③外部しゃへい壁(O/S)
- ④原子炉補助建屋(A/B)



解析モデル概念図



解放基盤表面で定義される基準地震動 S_s を基礎下端位置で解析モデルに入力

解析モデル(水平方向)

地盤定数

P波速度 (m/s)	S波速度 (m/s)	せん断弾性係数 (kN/mm ²)	密度 (kN/mm ³)	ポアソン比 ν
4300	1900	9.03	24.5	0.38

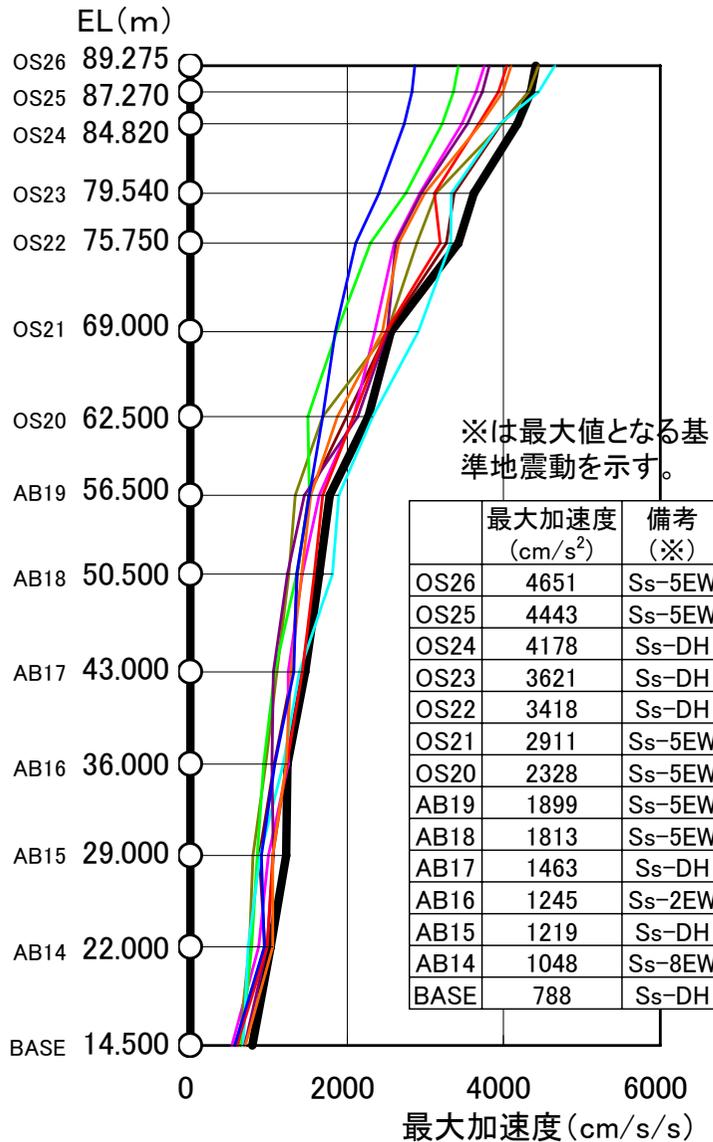
建物の材料定数及び減衰定数

	ヤング係数 (kN/mm ²)	せん断弾性係数 (kN/mm ²)	減衰定数※ (%)
鉄筋コンクリート構造物 (T/D,A/B,O/S,I/C)	22.51 (Fc=23.5N/mm ²)	9.38	5
溶接鋼構造物 (C/V)	189.26	72.76	1

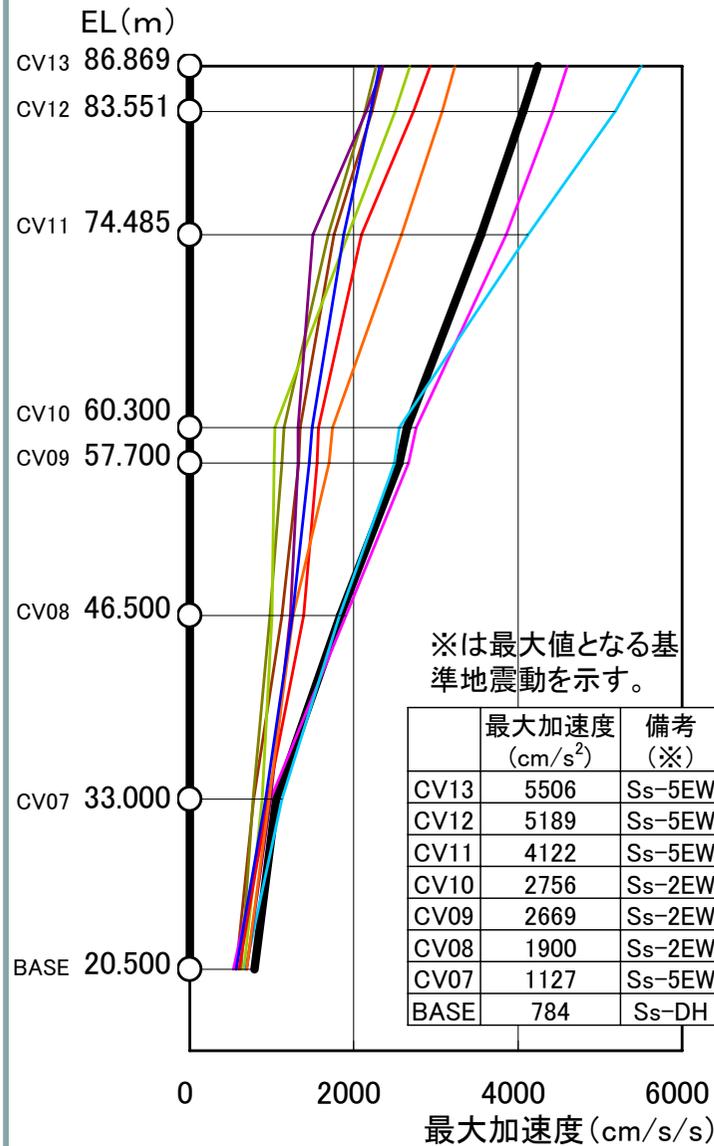
※: 減衰はひずみエネルギー比例型

Fc: 設計基準強度

A/B、O/S



C/V



【凡例】

◇ 応答スペクトルによる基準地震動

— Ss-DH

◇ 断層モデルによる基準地震動

C断層

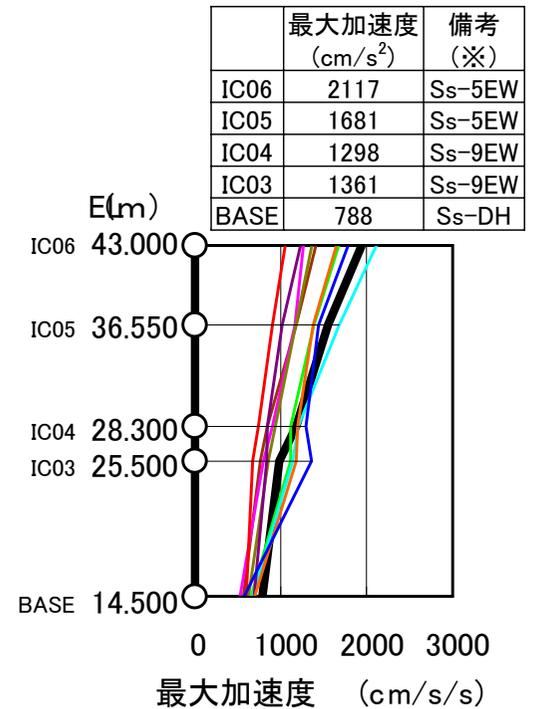
- Ss-1EW
- Ss-2EW
- Ss-3EW
- Ss-4EW
- Ss-5EW

白木-丹生断層

- Ss-6EW
- Ss-7EW
- Ss-8EW
- Ss-9EW

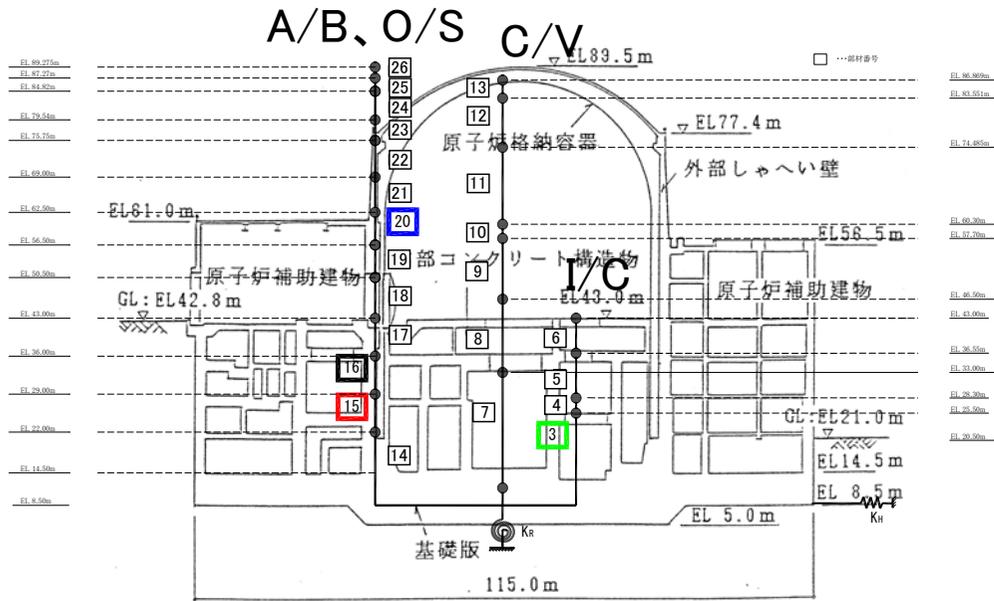
I/C

※は最大値となる基準地震動を示す。



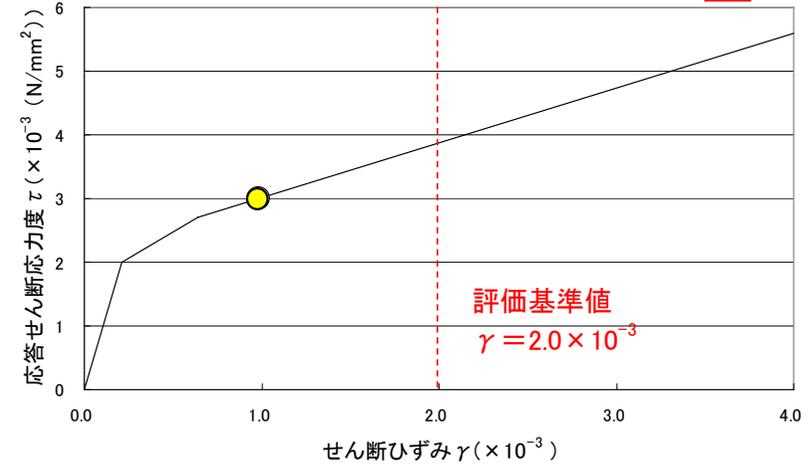
地震応答解析結果(EW方向): 各質点の最大加速度を示す

I-3. 原子炉建物・原子炉補助建物の評価結果



耐震壁の最大せん断ひずみは
評価基準値を下回る

(部材番号: 15)

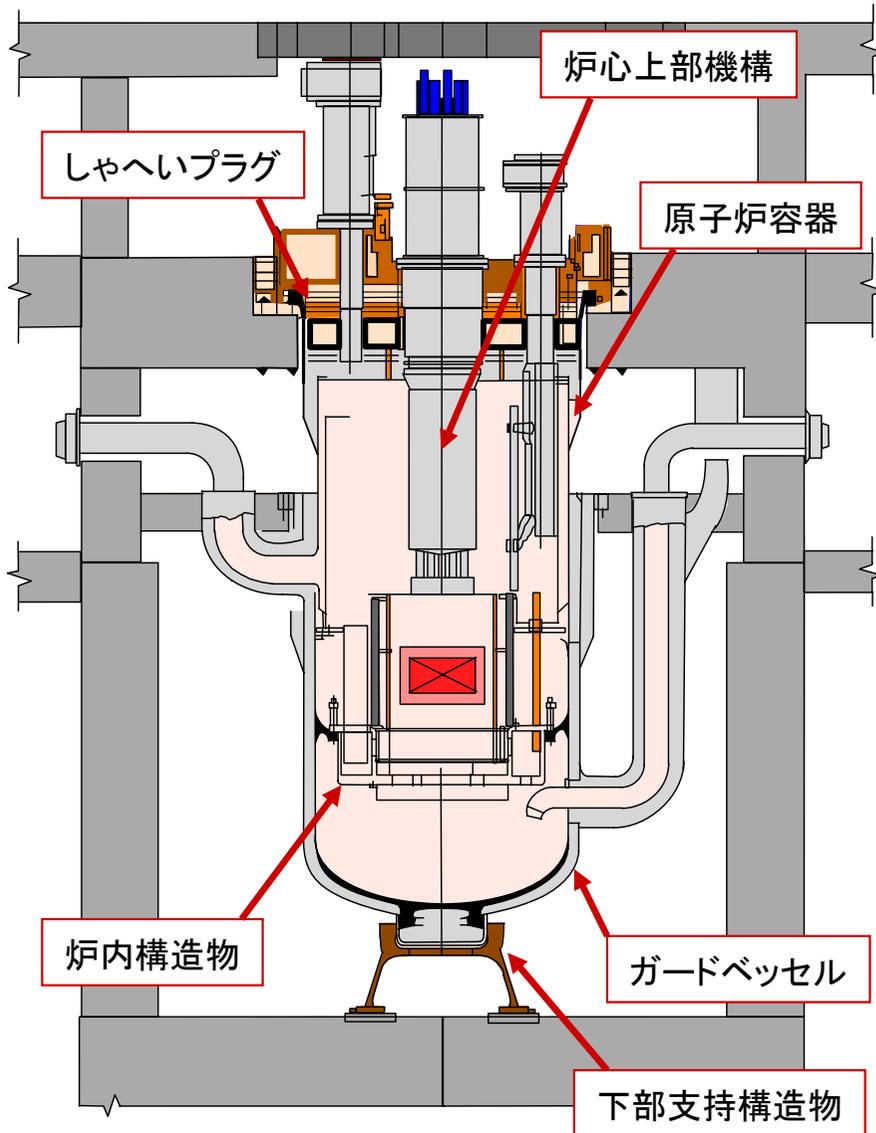


基準地震動Ss-DHに対するせん断ひずみ評価結果

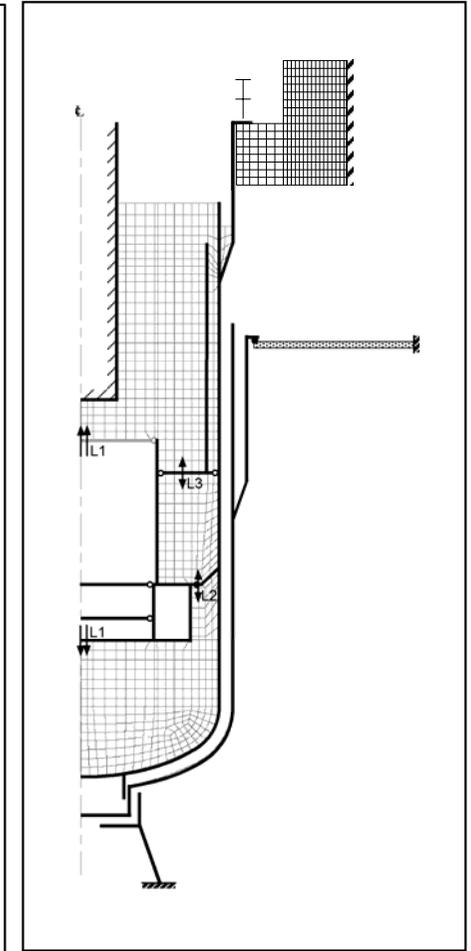
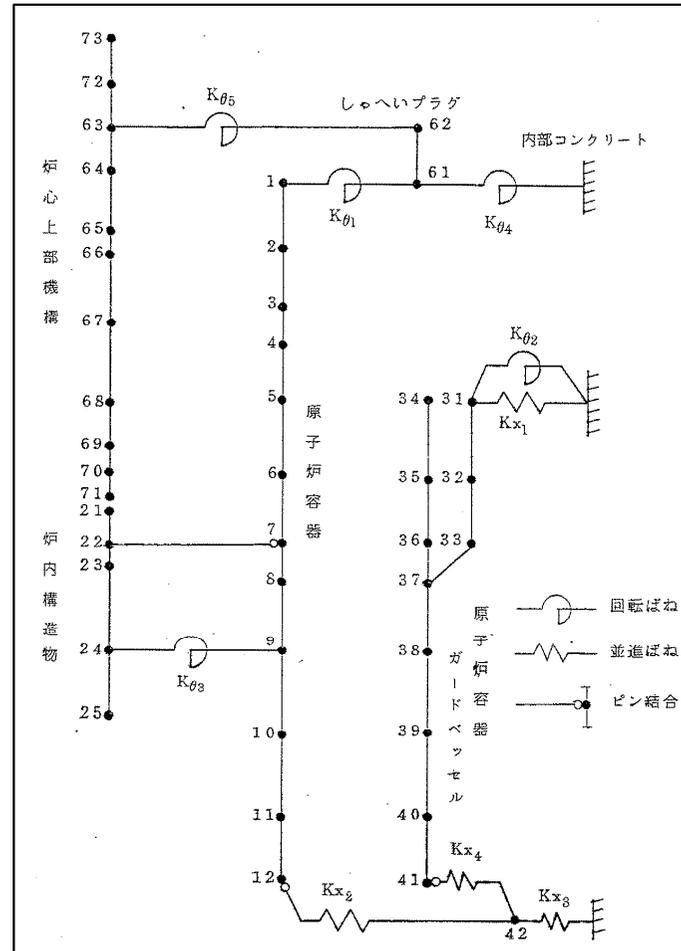
原子炉建物・原子炉補助建物評価結果

評価項目	解析方向	部位	評価結果									
			Ss-DH	Ss-1NS	Ss-2NS	Ss-3NS	Ss-4NS	Ss-5NS	Ss-6NS	Ss-7NS	Ss-8NS	Ss-9NS
せん断ひずみ $\gamma (\times 10^{-3})$	NS方向 (入力)	基準地震動	Ss-DH	Ss-1NS	Ss-2NS	Ss-3NS	Ss-4NS	Ss-5NS	Ss-6NS	Ss-7NS	Ss-8NS	Ss-9NS
		O/S	0.612	0.417	0.352	0.470	0.673	0.576	0.253	0.517	0.167	0.284
		A/B	0.894	0.508	0.344	0.618	0.803	0.555	0.267	0.625	0.239	0.238
		I/C	0.428	0.267	0.199	0.195	0.221	0.216	0.198	0.462	0.230	0.174
	EW方向 (入力)	基準地震動	Ss-DH	Ss-1EW	Ss-2EW	Ss-3EW	Ss-4EW	Ss-5EW	Ss-6EW	Ss-7EW	Ss-8EW	Ss-9EW
		O/S	0.698	0.495	0.428	0.410	0.224	0.857	0.448	0.560	0.460	0.203
		A/B	0.980	0.483	0.603	0.302	0.346	0.785	0.419	0.867	0.537	0.489
		I/C	0.524	0.202	0.209	0.208	0.269	0.536	0.172	0.161	0.343	0.409

原子炉構造の概要



原子炉構造の解析モデル



水平方向
多質点はりモデル

解析コード: NASTRAN

鉛直方向
2次元軸対称モデル

解析コード: FINAS

上部フランジ部で、基礎ボルトにより固定する吊り下げ構造。下部は支持構造物により水平方向のみ支持。

原子炉容器及び炉内構造物の耐震安全性評価部位

○原子炉冷却材バウンダリ機能の維持
(閉じ込める)

a. 構造上大きな地震荷重が発生する部位

- ・上部フランジ
- ・炉内構造物取付台
- ・下部サポート
- ・出入口ノズル

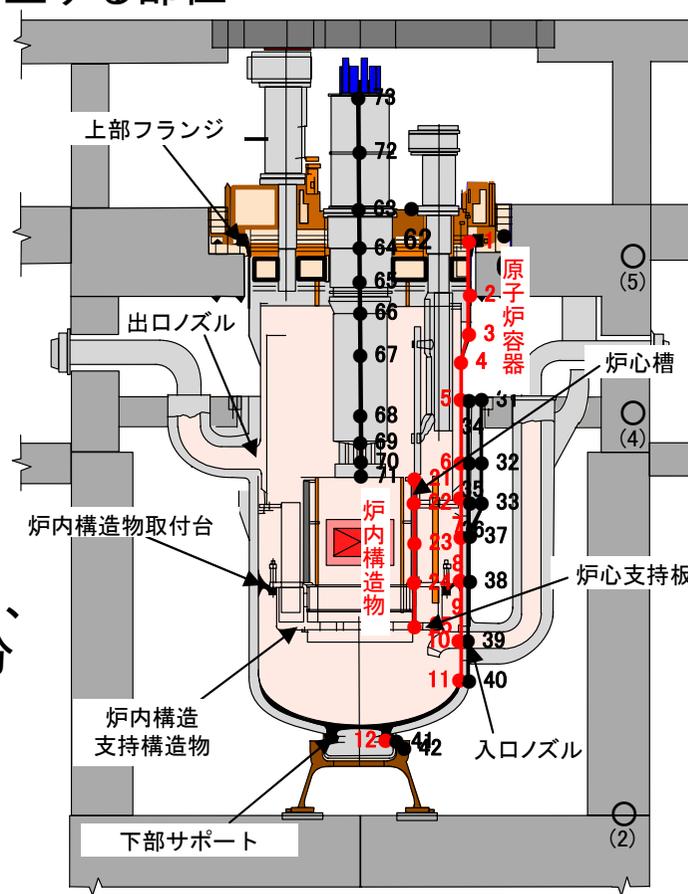
b. 座屈の評価

- ・中間胴

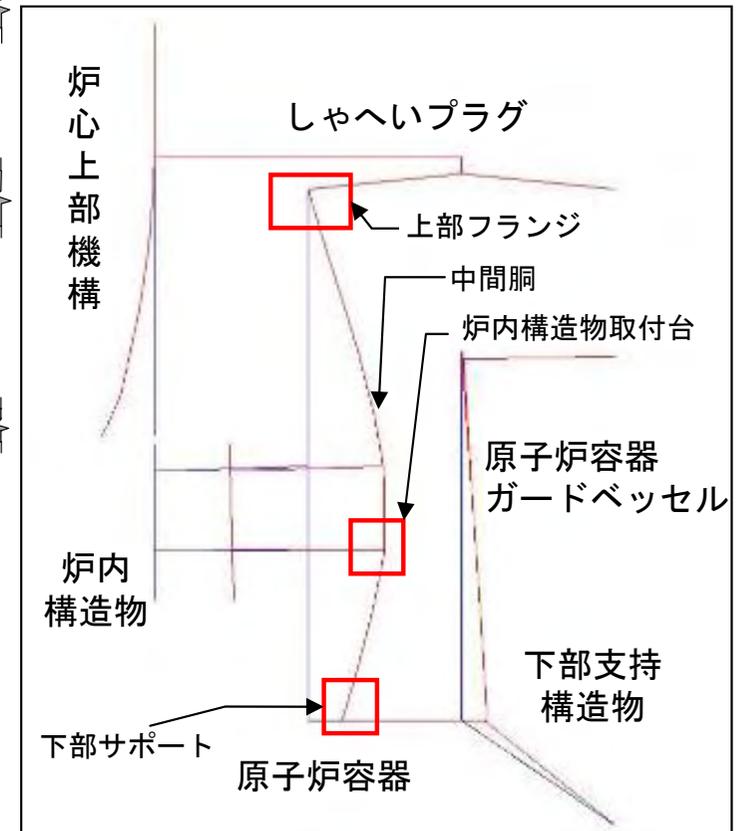
○崩壊熱の除去(冷やす)

炉心構成要素を支持すると共に、冷却材流路形成、炉内流量配分を行う部位

- ・炉心槽
- ・炉心支持板
- ・炉内構造支持構造物



解析結果例



固有振動モード

(水平1次:0.082s)

II-3. 原子炉容器及び炉内構造物の評価③(評価結果1)

建物地震応答解析による床応答スペクトルに基づいて、詳細解析(スペクトルモーダル解析法)を実施し、機器に発生する応力を求める。

評価対象 設備	評価部位	応力 分類	発生値 (MPa)		評価基準値 V_{AS}			判定	評価 手法
					材質	評価 温度 (°C)	評価 基準値 (MPa)		
原子炉容器	入口ノズル	膜	応答スペクトル波	183	SUS304	397	257	○	スペクトル モーダル解析
			断層モデル波	182				○	
		膜+曲げ	応答スペクトル波	183			385	○	スペクトル モーダル解析
			断層モデル波	182				○	
	出口ノズル	膜	応答スペクトル波	103	SUS304	529	231	○	スペクトル モーダル解析
			断層モデル波	91				○	
		膜+曲げ	応答スペクトル波	103			348	○	スペクトル モーダル解析
			断層モデル波	91				○	
	オーバフロー 汲上ノズル	膜	応答スペクトル波	129	SUS304	510	234	○	スペクトル モーダル解析
			断層モデル波	128				○	
		膜+曲げ	応答スペクトル波	129			351	○	スペクトル モーダル解析
			断層モデル波	128				○	

発生値は全て評価基準値を下回り、構造強度は確保される

Ⅱ－4. 原子炉容器及び炉内構造物の評価④(評価結果2)

建物地震応答解析による床応答スペクトルに基づいて、詳細解析(スペクトルモーダル解析法)を実施し、機器に発生する応力を求める。

評価対象 設備	評価部位	応力 分類	発生値 (MPa)		評価基準値 $V_A S$			判定	評価 手法
					材質	評価 温度 (°C)	評価 基準値 (MPa)		
原子炉容器	中間胴	座屈	応答スペクトル波	44	SUS304	529	72	○	スペクトル モーダル解析
			断層モデル波	41					
	上部フランジ	膜	応答スペクトル波	40	SUS304	111	291	○	スペクトル モーダル解析
			断層モデル波	34				○	
		膜+曲げ	応答スペクトル波	92			436	○	スペクトル モーダル解析
			断層モデル波	77				○	
	炉内構造物 取付台	膜	応答スペクトル波	136	SUS304	397	240	○	スペクトル モーダル解析
			断層モデル波	135				○	
		膜+曲げ	応答スペクトル波	160			361	○	スペクトル モーダル解析
			断層モデル波	158				○	
	下部サポート	膜	応答スペクトル波	101	SUS304	396	240	○	スペクトル モーダル解析
			断層モデル波	97				○	
		膜+曲げ	応答スペクトル波	309			361	○	スペクトル モーダル解析
			断層モデル波	300				○	

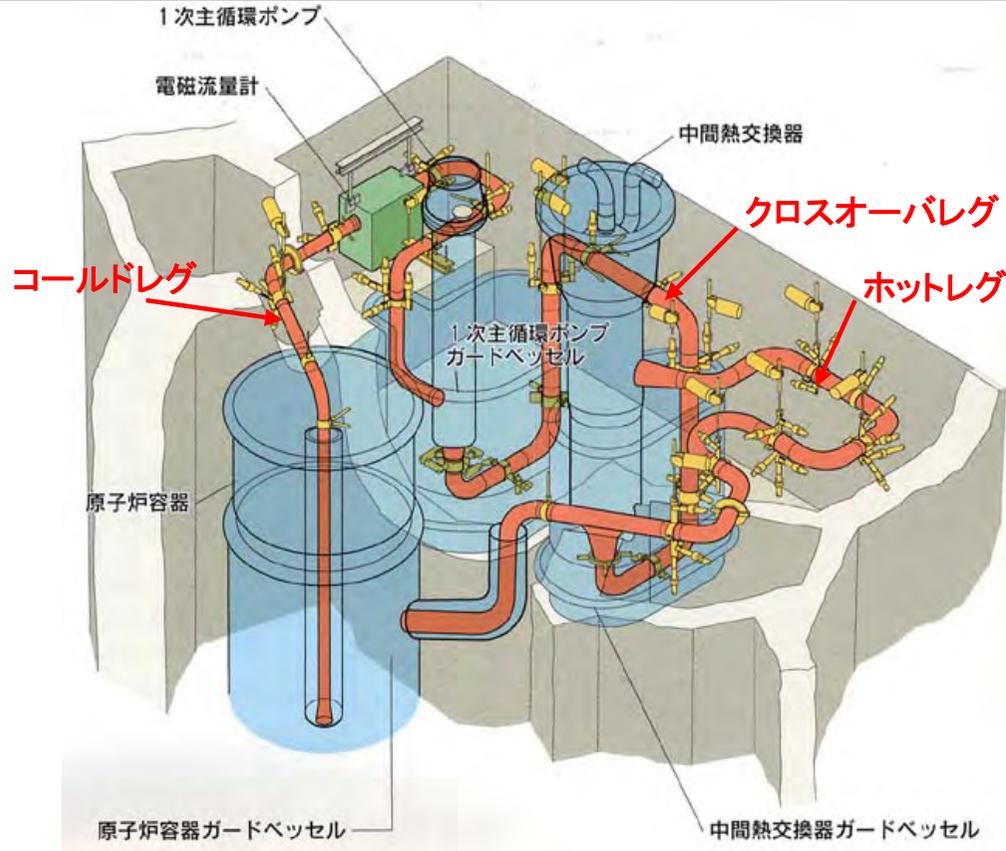
発生値は全て評価基準値を下回り、構造強度は確保される

II-5. 原子炉容器及び炉内構造物の評価⑤(評価結果3)

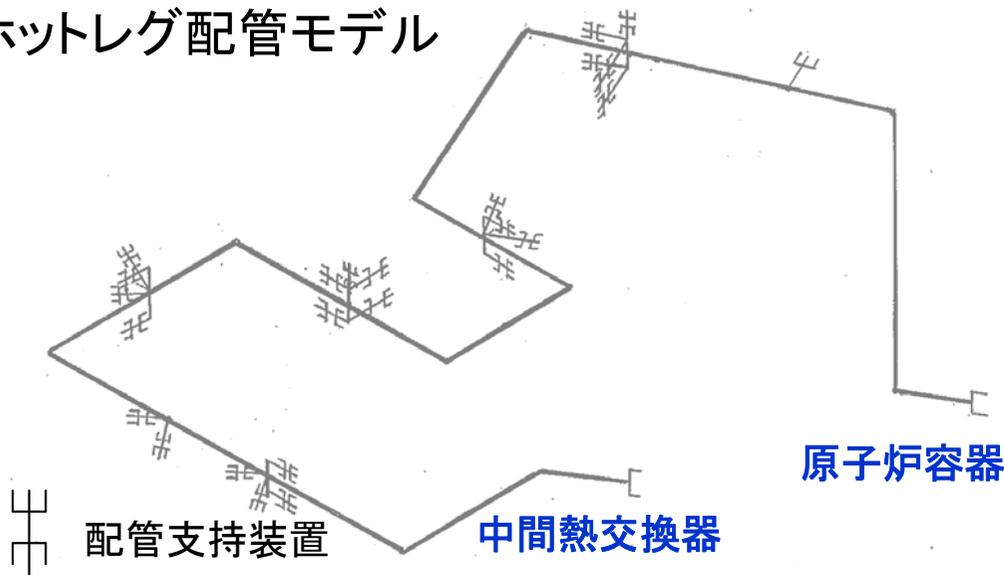
建物地震応答解析による床応答スペクトルに基づいて、詳細解析(スペクトルモーダル解析法)を実施し、機器に発生する応力を求める。

評価対象設備	評価部位	応力分類	発生値(MPa)		評価基準値 $IV_A S$			判定	評価手法
					材質	評価温度(°C)	評価基準値(MPa)		
炉内構造物	炉心槽	膜	応答スペクトル波	108	SUS304	474	239	○	スペクトルモーダル解析
			断層モデル波	102				○	
	炉内構造支持構造物	支圧応力	応答スペクトル波	151	SUS304	398	178	○	スペクトルモーダル解析
			断層モデル波	145				○	
	据付ボルト	膜+曲げ	応答スペクトル波	69	SUS304	412	380	○	スペクトルモーダル解析
			断層モデル波	56				○	
原子炉容器支持構造物	原子炉容器据付ボルト	引張	応答スペクトル波	244	SNB24-3	90	490	○	スペクトルモーダル解析
			断層モデル波	243				○	
	下部支持構造物	せん断	応答スペクトル波	17	SFVQ1A	180	196	○	スペクトルモーダル解析
			断層モデル波	17				○	
		曲げ	応答スペクトル波	73			392	○	スペクトルモーダル解析
			断層モデル波	72				○	
	下部支持構造物基礎ボルト	引張	応答スペクトル波	122	SS41	65	185	○	スペクトルモーダル解析
			断層モデル波	121				○	

発生値は全て評価基準値を下回り、構造強度は確保される



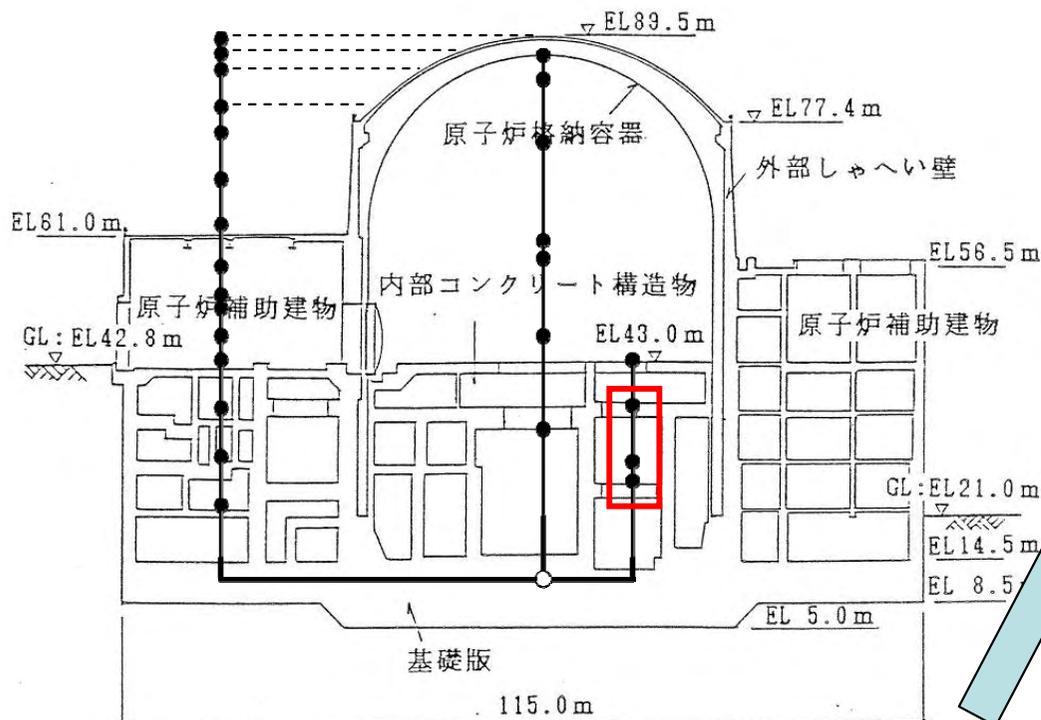
ホットレグ配管モデル



【解析手法】

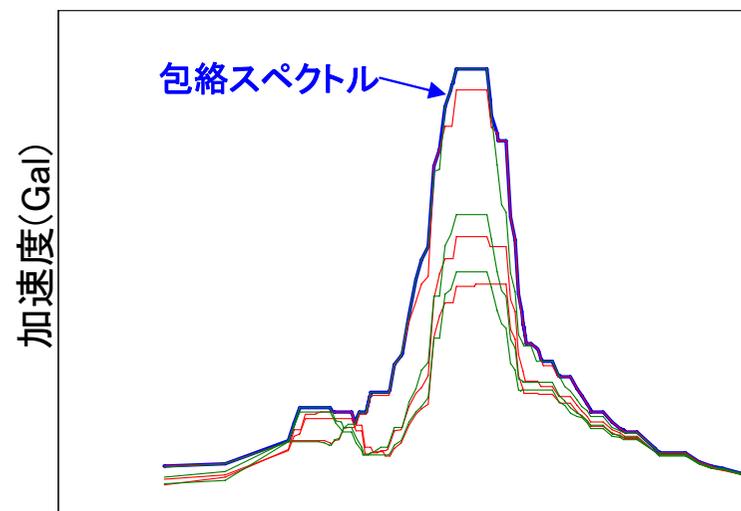
- 解析コード SAP(はり要素)
- 解析手法
スペクトルモーダル解析
- 流体及び保温材等の取扱いは等分布付加質量として考慮
- 入力地震動
各フロアにまたがる配管設置位置の床応答スペクトルの包絡スペクトルを入力
- 機器ノズル
機器ノズルの剛性をバネでモデル化

包絡スペクトルによる評価



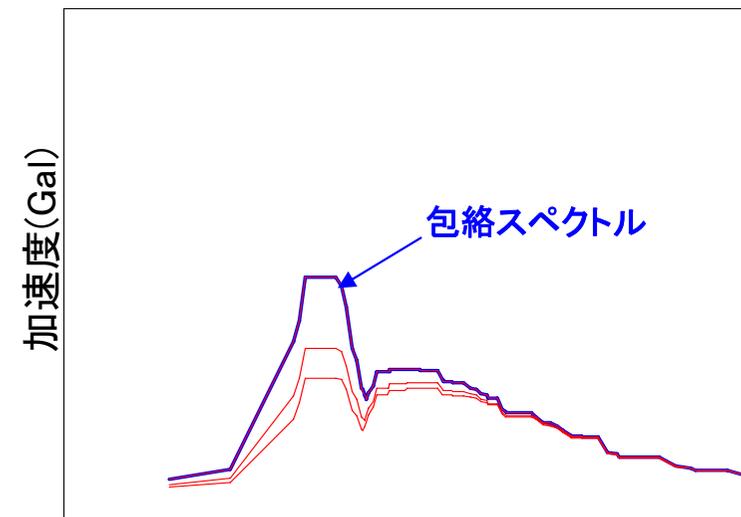
1次主冷却系主配管設置床レベル
⇒EL25.5m、EL28.3m、EL36.55m

スペクトルモーダル解析では各床レベルの床応答スペクトルを包絡するスペクトルを用いて地震荷重を算定。また水平方向はNS方向、EW方向の包絡スペクトルを用いて地震荷重を算定。



周期(s)

包絡スペクトル(水平方向)



周期(s)

包絡スペクトル(鉛直方向)

構造基準による応力評価(一次応力)

<応力評価式>

「ナトリウム冷却型高速増殖炉発電所の原子炉施設に関する構造等の技術基準」高速原型炉第1種機器の高温構造設計指針を適用

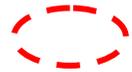
$$\underbrace{\frac{B_1 P D_0}{200t}}_{\text{内圧による応力}} + \underbrace{\frac{B_2 D_0}{2I} (M_i + M_i^*)}_{\text{自重、地震のモーメントによる応力}} + \underbrace{\frac{|Fa + Fa^*|}{A}}_{\text{自重、地震、熱膨張、相対変位の軸力による応力}} \leq 2K_s S_m$$

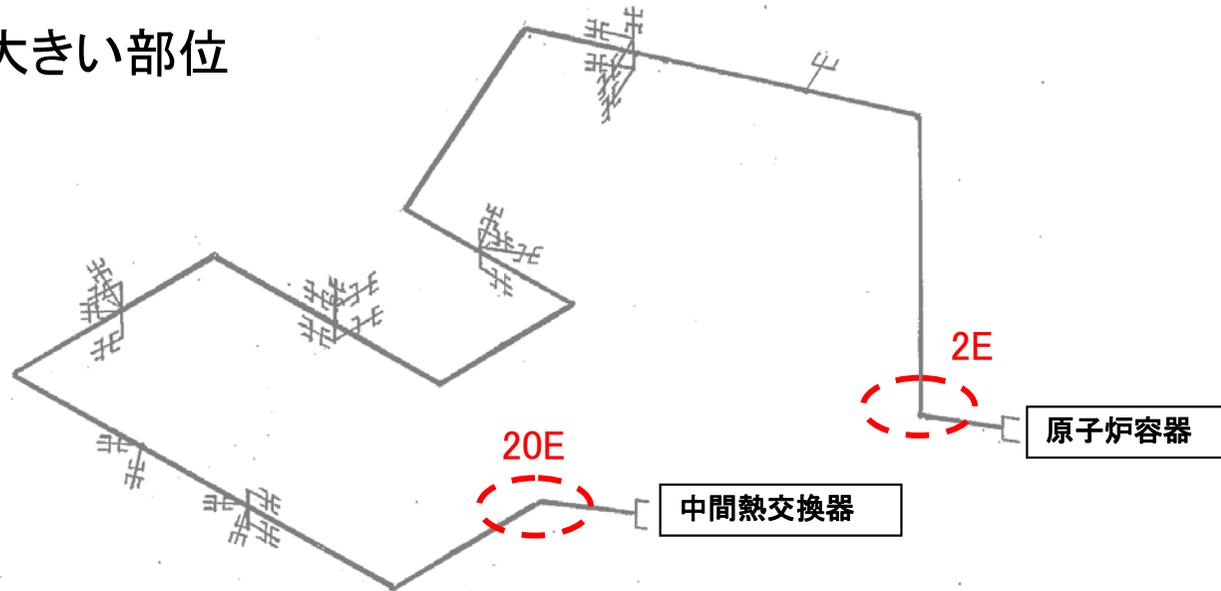
評価基準値
(IV_AS)

■もんじゅ構造基準の一次応力評価では薄肉の影響を考慮して、自重や地震時のモーメントに加え、軸力を評価する

■上記以外はB₁, B₂の応力係数を使用した評価
(軽水炉と同一の評価)

B₁, B₂ : 応力係数
 D₀ : 管外径
 P : 内圧
 t : 管肉厚
 I : 断面2次モーメント
 A : 断面積
 M_i : モーメント
 Fa : 軸力
 * : 短期荷重(地震)
 K_s : 断面形状係数
 S_m : 設計応力強さ

 : 発生値の大きい部位



裕度(評価基準値/発生値)が最も小さい配管の評価結果(ホットレグ)

評価部位	応力分類	発生値 (MPa)		評価基準値 IV_{AS}			判定	評価方法
				材質	評価温度 (°C)	評価基準値 (MPa)		
エルボ20E	一次応力 (膜+曲げ応力)	応答スペクトル波	114	SUS304	529	245	○	スペクトル モーダル解析
		断層モデル波	75				○	
エルボ2E		応答スペクトル波	93				○	
		断層モデル波	79				○	

高速原型炉第1種管 評価基準値(IV_{AS}) = $2K_s S_m$

K_s : 断面形状係数 全断面降伏荷重/初期断面降伏荷重(薄肉配管の場合1.27)

S_m : 設計応力強さ

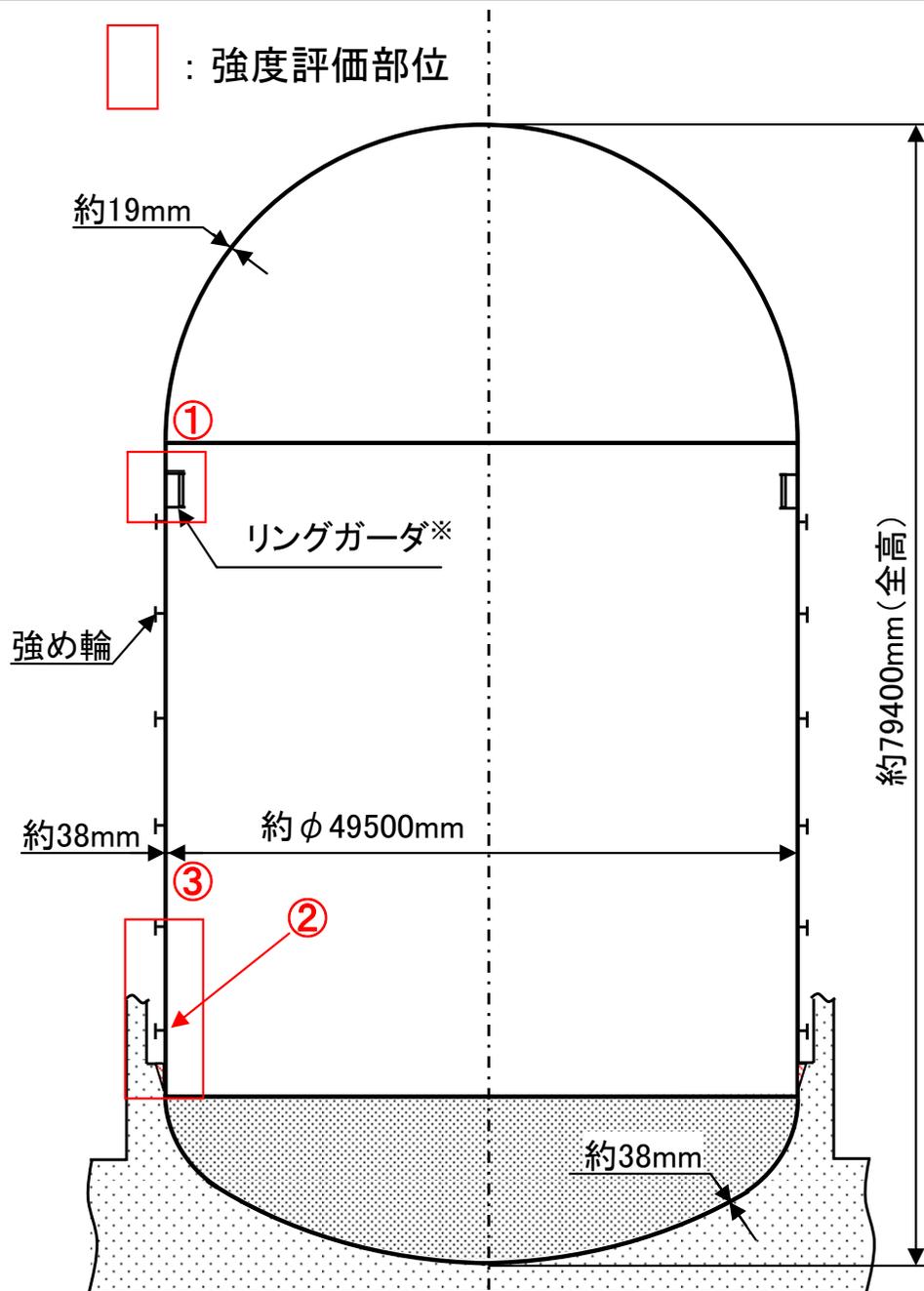
構造強度評価の着眼点

- (1) 一次応力評価
- (2) 座屈の評価

構造強度評価部位

構造上大きな地震荷重が発生する部位

- (1) 一次応力評価:
(応答倍率法による評価)
 - ① リングガーダ取付部
 - ② 強め輪取付部(最下部の強め輪)
- (2) 座屈評価:
(詳細評価)
- ③ 円筒胴(下部)



※: ポーラークレーンを支える構造物

建物(原子炉格納容器)の地震応答解析による床応答スペクトルに基づいて、応答倍率法により機器に発生する応力を求める。

評価部位	応力分類	発生値 (MPa)		評価基準値 $IV_A S$			判定	評価方法
				材質	評価温度 (°C)	評価基準値 (MPa)		
リング ガーダ 取付部	膜	応答スペクトル波	11	SGV480	150	232	○	応答 倍率法
		断層モデル波	12					
	膜+曲げ	応答スペクトル波	261			348	○	応答 倍率法
		断層モデル波	288					
強め輪 取付部 (最下部)	膜	応答スペクトル波	59	SGV480	150	232	○	応答 倍率法
		断層モデル波	68					
	膜+曲げ	応答スペクトル波	59			348	○	応答 倍率法
		断層モデル波	68					

発生値は全て評価基準値を下回り、構造強度は確保される

解析手法 : FEMによる静的弾塑性座屈解析

解析コード: ABAQUS

主要要素 : 3次元シェル要素

解析対象 : 弾性材下端より上部
(円筒胴部+上部半球)

解析条件 :

(1) 材料物性:

① 応力-ひずみ関係
弾完全塑性

② 降伏応力 σ_y 、縦弾性係数 E
最高使用温度 150°C の値

(2) 初期不整:

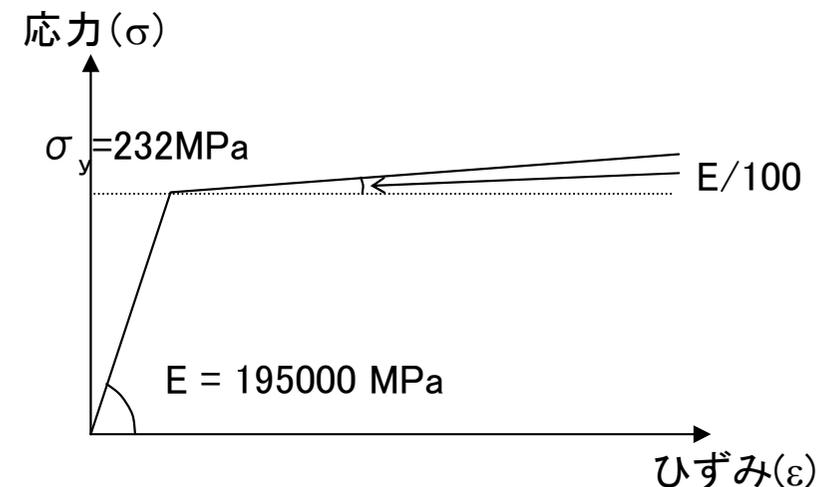
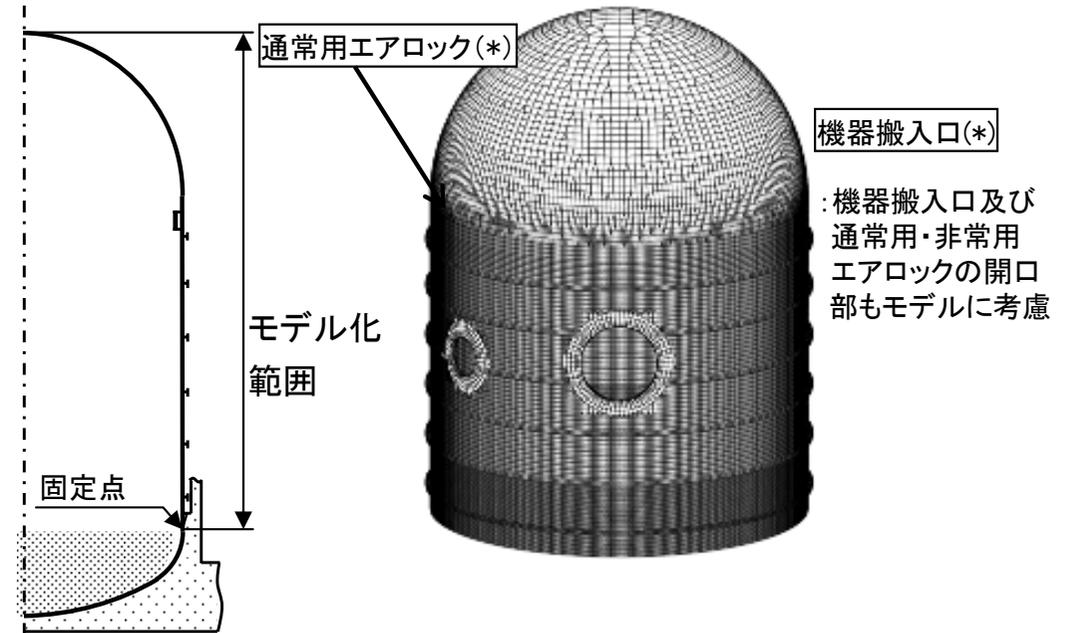
① 弾性座屈固有値解析から得られる座屈モードに合わせて初期不整の形状パターンを設定

② 初期不整量(初期状態で存在する微少な変形)は、据付寸法計測記録に基づき、 24.5mm とした

(3) 負荷条件:

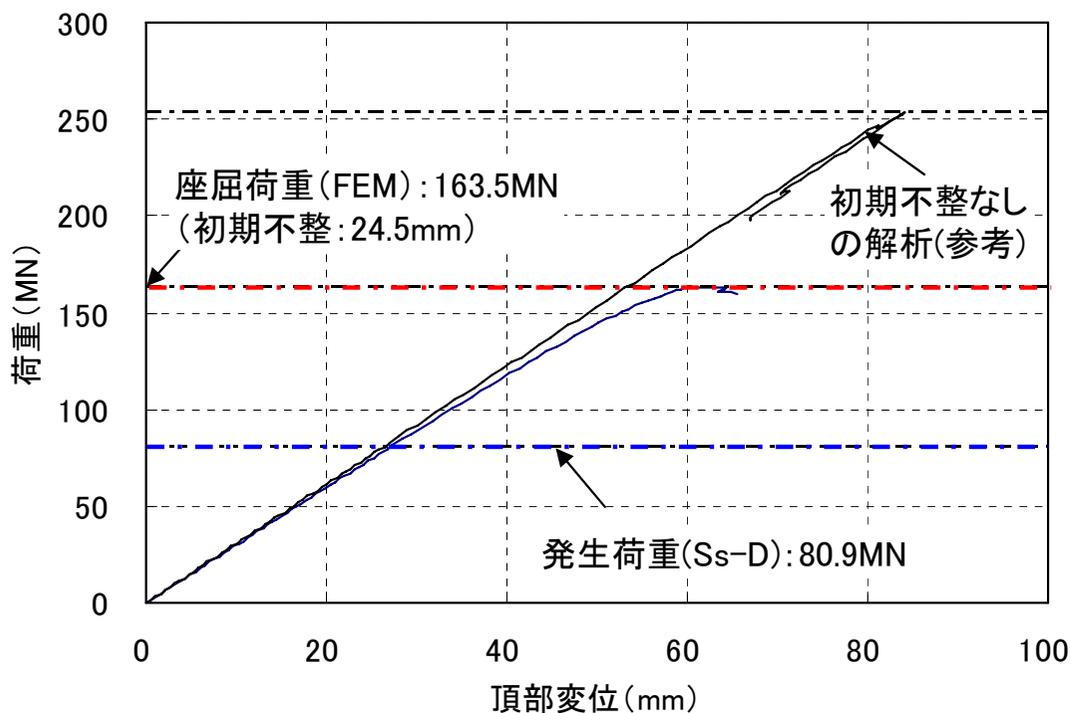
水平荷重と鉛直荷重の同時負荷
(荷重を一定比率のまま漸増)

座屈耐力評価

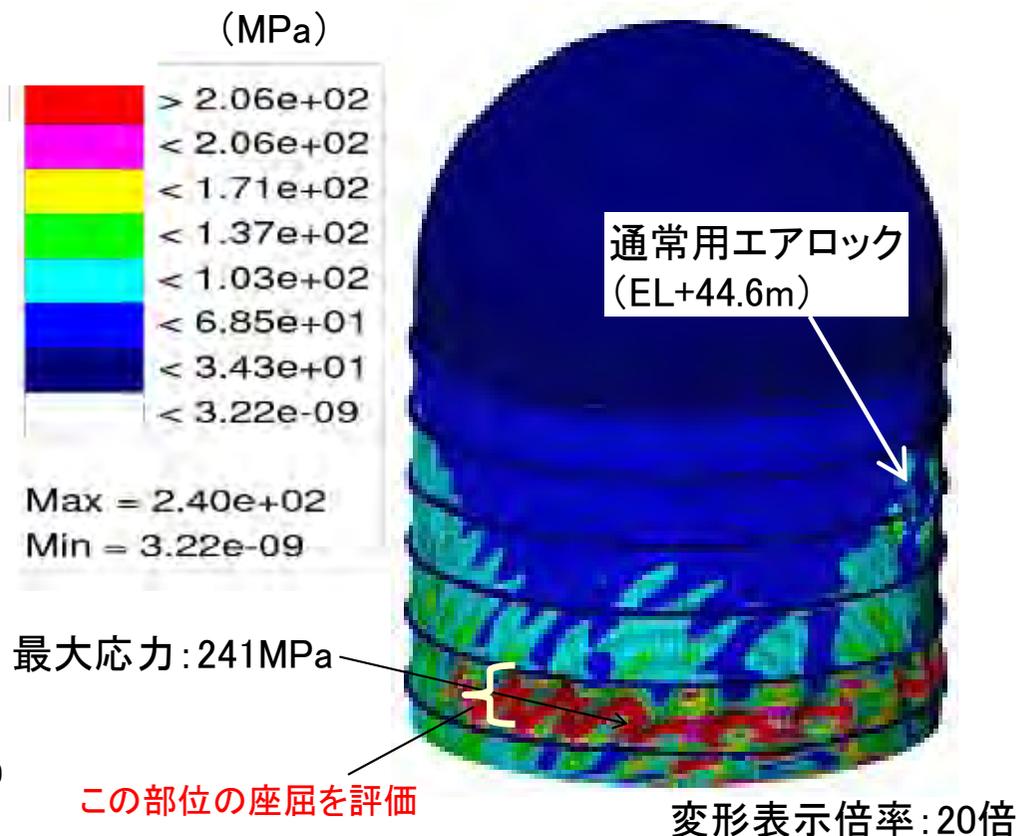


応力-ひずみ関係
SGV480 150°C

FEMによる座屈耐力評価結果



頂部変位－荷重関係(EW方向)

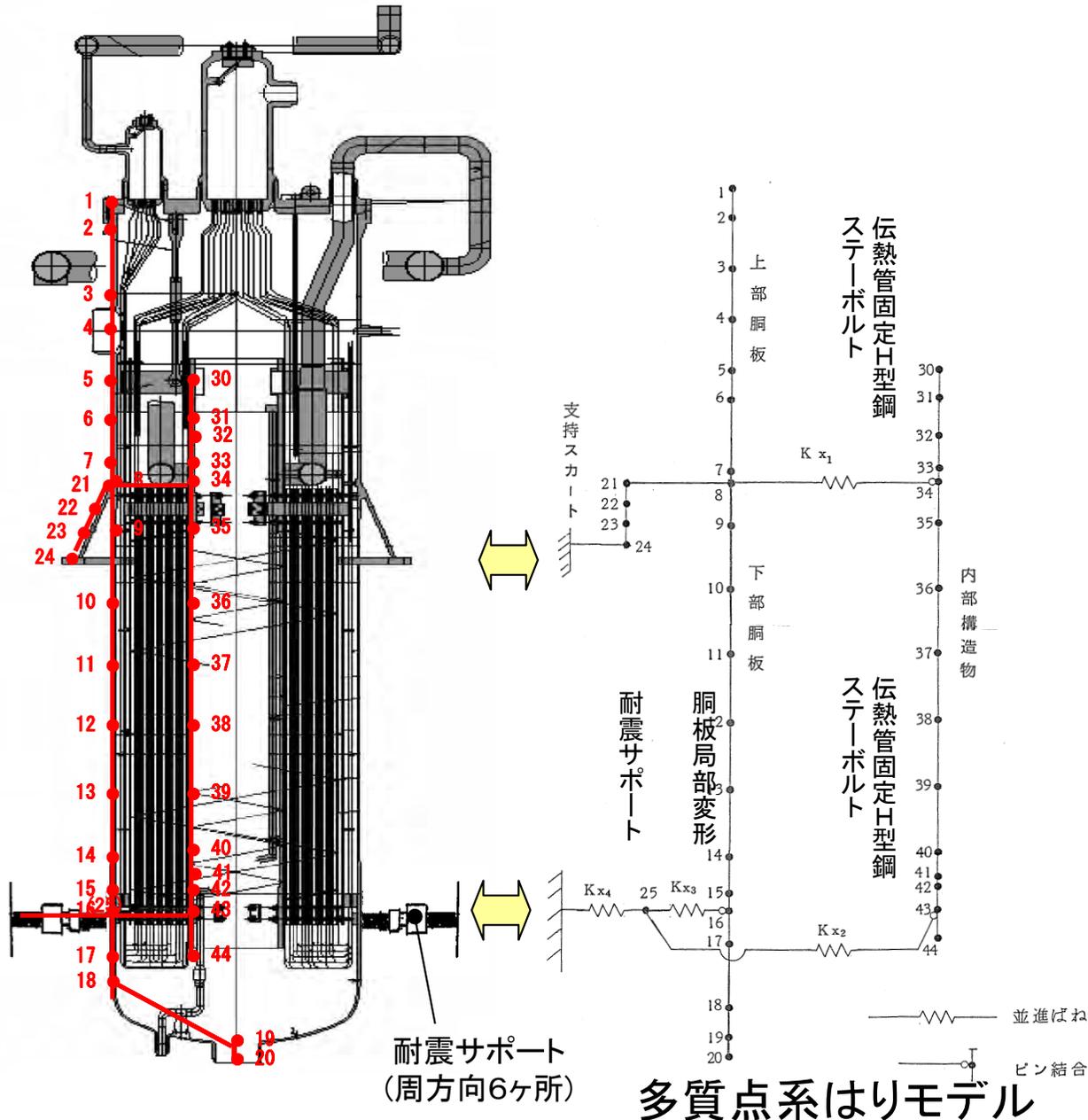


最大荷重時の変形・Mises応力コンター図(EW方向、外表面)

評価位置	荷重方向	自重(MN)	発生荷重(Ss-D)(MN)		座屈荷重(FEM)(MN)		発生荷重(Ss-D) / 座屈荷重(FEM)	評価基準値	判定	評価方法
			水平	鉛直	水平	鉛直				
円筒胴下部	NS	40.9	水平	76.3	水平	173.8	0.44	1	○	FEM解析
			鉛直	8.45	鉛直	19.24				
	EW	40.9	水平	80.9	水平	163.5	0.50	1	○	FEM解析
			鉛直	8.45	鉛直	17.08				

蒸気発生器の解析モデル

解析モデル(水平方向)



解析モデルの考え方

- ・はり剛性
上部胴板、下部胴板、スカート、内部構造物(内筒のみ)を円筒として剛性を考慮
- ・質量
はり剛性を考慮する鋼材以外に、伝熱管、保温材・ヒータ、付属部品の質量を考慮
- ・流体の取扱い
流体は付加質量として考慮
- ・支持、結合部
伝熱管固定H型鋼、ステーボルト、耐震サポートは、モーメントを伝達しないためばね要素でモデル化
ばね要素には、内筒と胴板の局部変形を考慮
- ・物性値
定格運転温度の値を使用
- ・入力地震動
スカートと耐震サポート(⇔部)に入力
- ・解析コード
NASTRAN

耐震性から考えられる蒸発器の構造上の特徴

- ・スカート部で建物と基礎ボルトにより固定
- ・蒸発器下部胴板には耐震サポートを設け、地震による水平方向変位を抑制

蒸発器の構造強度評価部位

○ナトリウム保持機能の維持

a. 構造上大きな地震荷重が発生する部位

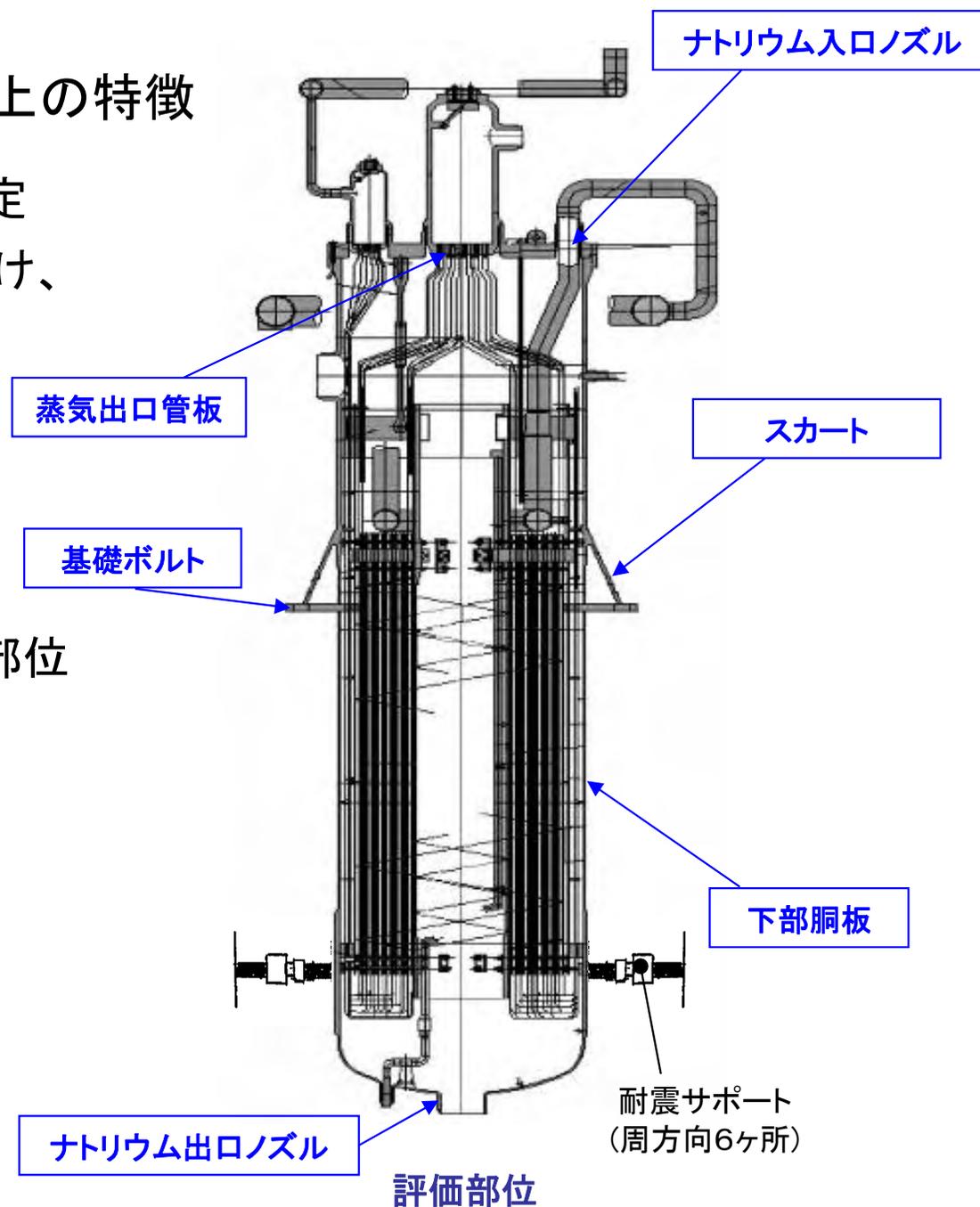
- ・ナトリウム出入口ノズル
- ・スカート
- ・基礎ボルト

b. 薄肉構造への配慮

- ・下部胴板の座屈

c. 内圧が高く、熱荷重が厳しい部位

- ・蒸気出口管板



V-3. 蒸気発生器(蒸発器)の評価③(評価結果1)

建物地震応答解析による床応答スペクトルに基づいて、詳細解析(スペクトルモーダル解析法)を実施し、機器に発生する応力を求める。

評価対象設備	評価部位	応力分類	発生値 (MPa)		評価基準値 V_{AS}			判定	評価方法		
					材質	評価温度 (°C)	評価基準値 (MPa)				
2次主冷却系蒸発器	ナトリウム入口ノズル	膜	応答スペクトル波	152	SUS304	489	225	○	スペクトルモーダル解析		
			断層モデル波	149							
		膜+曲げ	応答スペクトル波	152			337	○			
			断層モデル波	149							
	ナトリウム出口ノズル	膜	応答スペクトル波	135	SFVAF22B	325	258	○	スペクトルモーダル解析		
			断層モデル波	143							
		膜+曲げ	応答スペクトル波	135			387	○			
			断層モデル波	143							
	スカート	膜	応答スペクトル波	155	SFVAF22B	257	259	○	スペクトルモーダル解析		
			断層モデル波	148							
		膜+曲げ	応答スペクトル波	296			388	○			
			断層モデル波	282							
		支圧応力(*1)	応答スペクトル波	121			SCMV4	264		431	○
			断層モデル波	108							

*1 容器内壁に直接押しつけられる振れ止め金物の断面積より支圧応力を算定

発生値は全て評価基準値を下回り、構造強度は確保される

V-4. 蒸気発生器(蒸発器)の評価④(評価結果2)

建物地震応答解析による床応答スペクトルに基づいて、詳細解析(スペクトルモーダル解析法)を実施し、機器に発生する応力を求める。

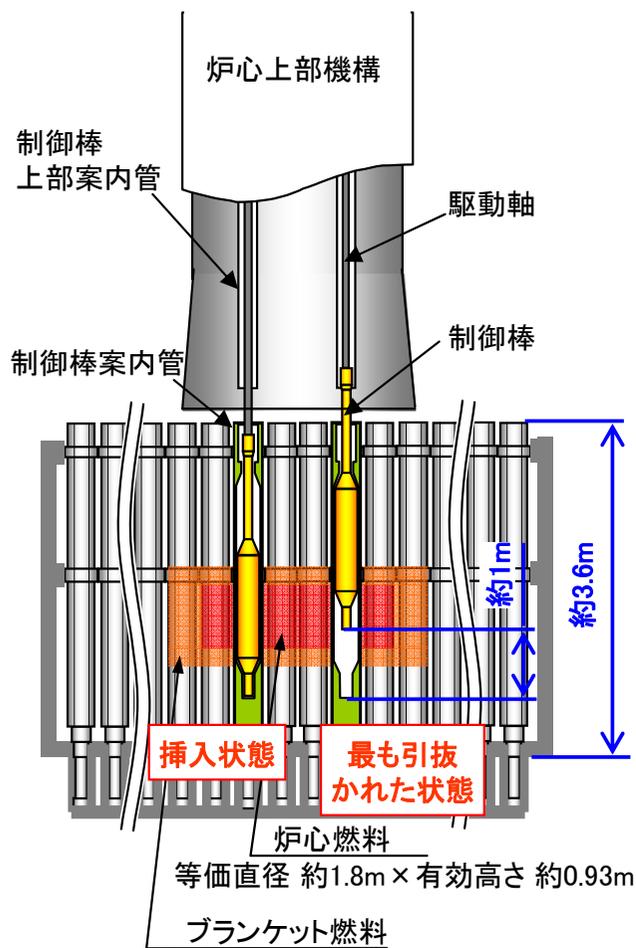
評価対象設備	評価部位	応力分類	発生値 (MPa)		評価基準値 V_{AS}			判定	評価方法	
					材質	評価温度 (°C)	評価基準値 (MPa)			
2次主冷却系蒸発器	下部胴板	座屈	応答スペクトル波	33	SCMV4	264	161	○	スペクトルモーダル解析	
			断層モデル波	29						
	蒸気出口管板	膜	応答スペクトル波	86	SFVAF22B	366	258	○	スペクトルモーダル解析	
			断層モデル波	84						
		膜+曲げ	応答スペクトル波	86			386	○	スペクトルモーダル解析	
			断層モデル波	84						
	2次主冷却系蒸発器 支持構造物	スカート	組合せ	応答スペクトル波	51	SCMV4	65~220	294	○	スペクトルモーダル解析
				断層モデル波	44					
座屈(*2)			応答スペクトル波	0.18	1			○		スペクトルモーダル解析
			断層モデル波	0.15						
基礎ボルト		引張	応答スペクトル波	365	SNB7	80	408	○	スペクトルモーダル解析	
			断層モデル波	359						

*2 座屈の値は軸圧縮荷重と曲げモーメントのそれぞれについて発生値と許容値の比率で求めた値を足し合わせた値

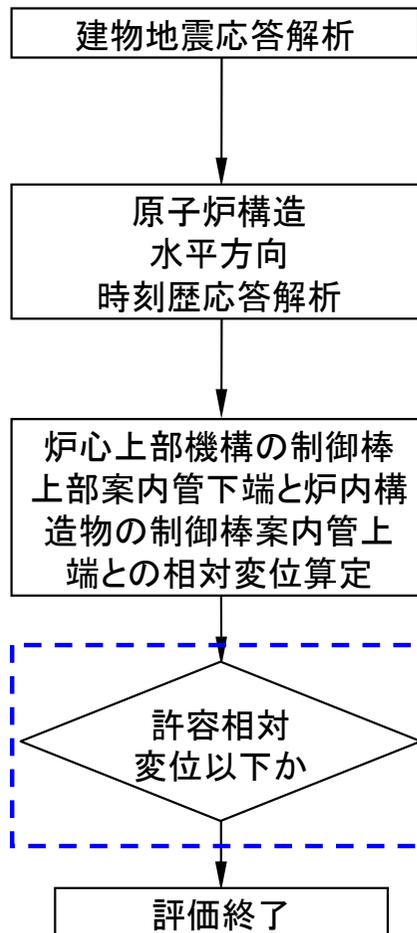
発生値は全て評価基準値を下回り、構造強度は確保される

もんじゅの原子炉停止系

- ・主炉停止系と後備炉停止系の独立2系統
- ・機構を変えることで多様性も確保



制御棒挿入性の評価の流れ



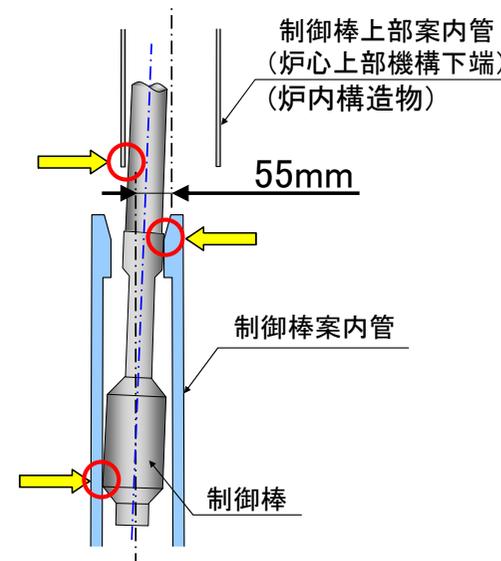
■ 要求機能

規定の時間内(全ストロークの85%挿入までの時間1.2秒)に挿入されること

■ 許容相対変位 55 mm

○ 相対変位が55mm以下であれば、要求機能を満足することを水中での静的及び動的(加振)スクラム試験で確認済

○ 従って、原子炉構造の地震応答解析により相対変位が55 mm以下であれば、要求機能を満足する

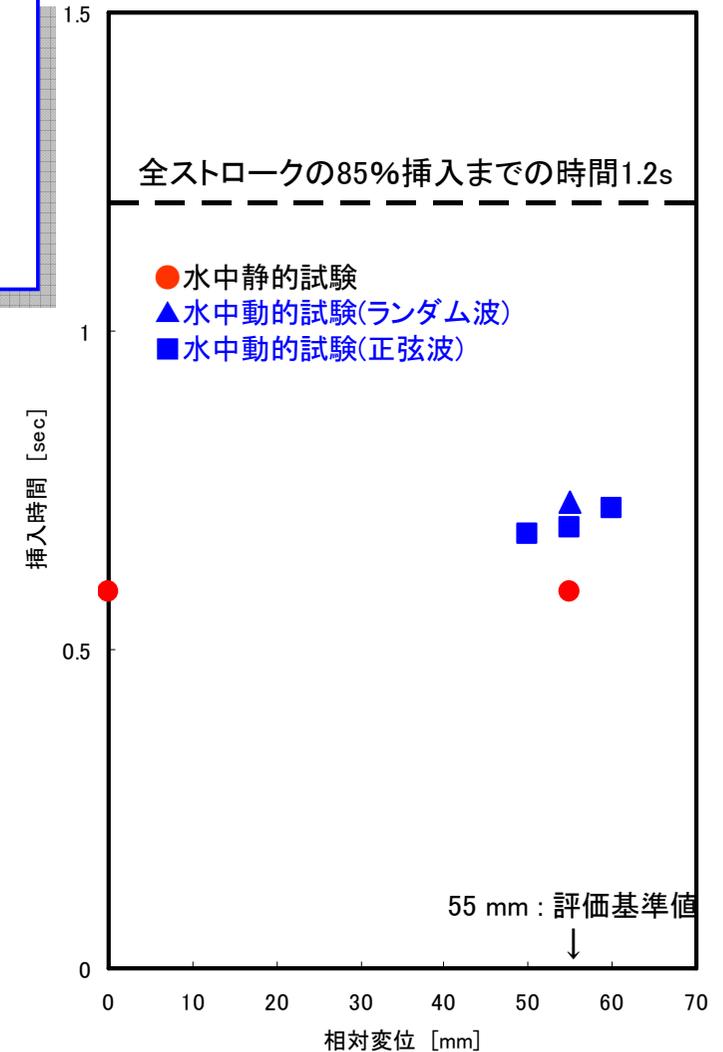


制御棒の概要及び挿入性評価の流れ

静的及び動的スクラム試験結果から、いずれも炉心上部機構下端と制御棒案内管上端との相対変位55mmにおいて要求機能の全ストローク85%挿入までの時間1.2sを満足

→許容相対変位として評価基準値を55mmとする

試験	加振振動数 Hz		最大 相対 変位 mm	最大先端変位 mm		挿入時間 秒	
	炉心上 部機構	制御棒 案内管		炉心上 部機構	制御棒 案内管		
静的1	—	—	0	—	—	0.59	
静的2	—	—	55	—	—	0.59	
動的	正弦波1	7.1	2.8	50	20	30	0.68
	正弦波2	7.1	2.8	55	22	33	0.69
	正弦波3	7.1	2.8	60	24	36	0.72
	ランダム波*1	—	—	55	37	40	0.73



*1 : ランダム波及び実機Ss評価では、最大先端変位の発生時刻が異なるため、それらの和は最大相対変位とは等しくならない

試験結果

制御棒挿入性の静的及び動的スクラム試験結果

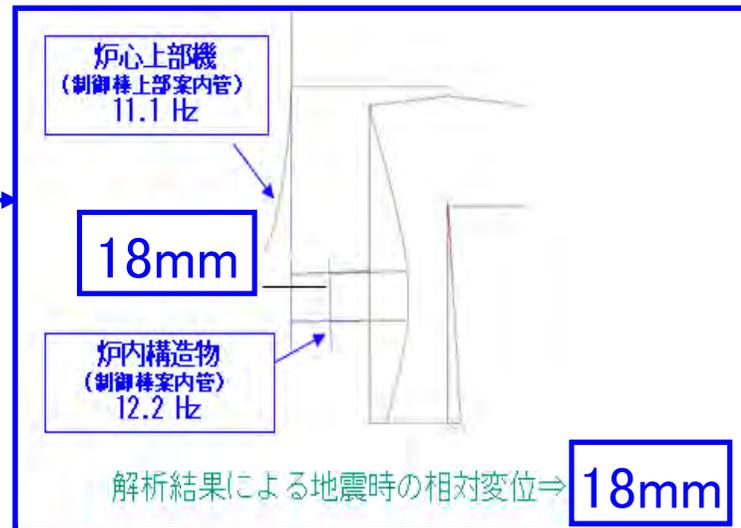
相対変位の算出方法

炉心上部機構下端の制御棒上部案内管と制御棒案内管との相対変位は以下をもとに算出

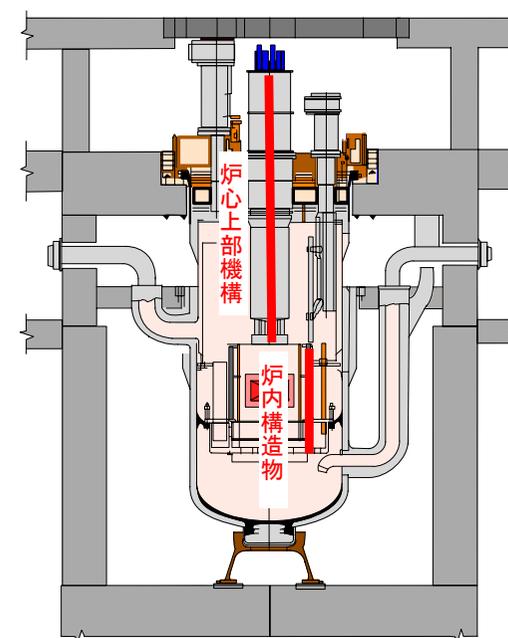
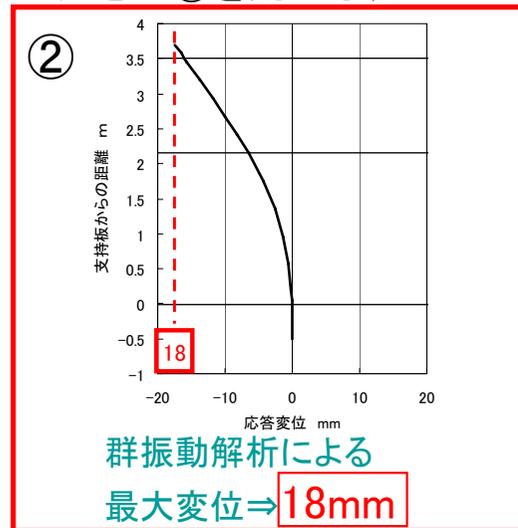
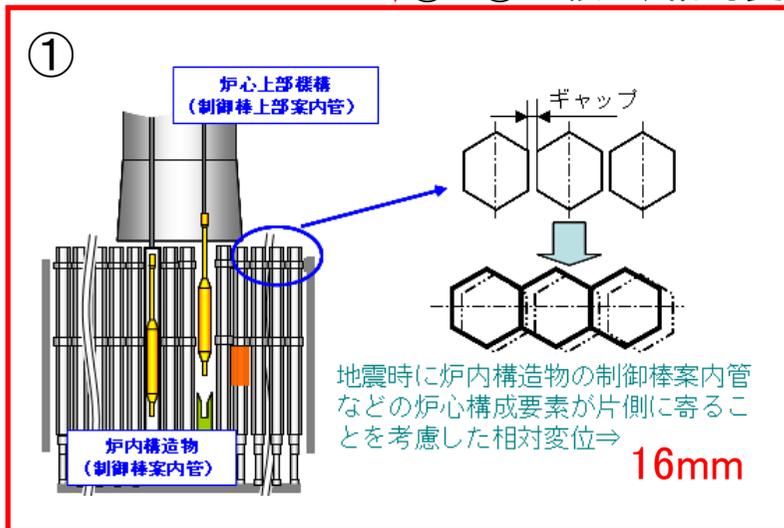
■ 炉心上部機構下端と炉内構造物上端との相対変位 **18mm**
 水平方向の地震応答解析(時刻歴応答解析)より算出

■ 制御棒案内管と炉心槽との相対変位 **18 mm**

- ① 炉心構成要素が炉心槽内で総片寄りしたときの制御棒案内管の幾何学的な相対変位(=上部スペーサパッド部のギャップの累積量)から算出 **16mm**
- ② 炉心を構成する燃料集合体等の群振動解析結果より得られる制御棒案内管の最大変位量 **18mm**



①と②比較し、相対変位の大きい②を用いる



相対変位 $36 \text{ mm} (18 + 18) \leq 55 \text{ mm}$ (許容相対変位)

変位及び挿入時間に対する挿入性は確保されている

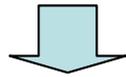
評価対象	評価部位	評価項目と単位	発生値	評価基準値	判定	評価手法
原子炉建物・原子炉補助建物	耐震壁	せん断ひずみ	0.98×10^{-3}	2.0×10^{-3}	○	時刻歴応答解析
原子炉容器	上部フランジ	応力(MPa)	92	436	○	スペクトルモーダル解析
	炉内構造物	応力(MPa)	136	240	○	
	下部サポート	応力(MPa)	309	361	○	
炉内構造物	支持構造物	応力(MPa)	151	178	○	スペクトルモーダル解析
1次主冷却系主配管	配管	応力(MPa)	114	245	○	スペクトルモーダル解析
1次主冷却系中間熱交換器	2次出口ノズル	応力(MPa)	126	223	○	応答倍率法
	伝熱管	応力(MPa)	176	231	○	
	基礎ボルト	応力(MPa)	115	361	○	
1次主冷却系循環ポンプ	吸込口	応力(MPa)	173	257	○	応答倍率法
	オーバフローノズル	応力(MPa)	49	257	○	
	基礎ボルト	応力(MPa)	47	341	○	
2次主冷却系主配管	配管	応力(MPa)	213	260	○	スペクトルモーダル解析
2次主冷却系循環ポンプ	吸込口	応力(MPa)	164	231	○	応答倍率法
	オーバフローノズル	応力(MPa)	57	231	○	
	取付ボルト	応力(MPa)	14	341	○	
補助冷却系設備主配管	配管	応力(MPa)	214	275	○	スペクトルモーダル解析
補助冷却系設備空気冷却器	ダクト	モーメント(kN・m)	5.25×10^5	7.61×10^5	○	スペクトルモーダル解析
原子炉格納容器	クレーン荷重発生部	応力(MPa)	288	348	○	応答倍率法
	下端部	応力(MPa)	68	232	○	
蒸気発生器(蒸発器)	ナトリウム出口ノズル	応力(MPa)	143	258	○	スペクトルモーダル解析
	スカート	応力(MPa)	296	388	○	
	基礎ボルト	応力(MPa)	365	408	○	
制御棒	挿入性	相対変位(mm)	36	55	○	時刻歴応答解析

： 断層モデル波による発生値を示す

発生値はすべて評価基準値を下回っており、耐震安全性を確保していることを確認

- ◆ 国の委員会において、原子力安全・保安院から示された「活断層等に係る評価の中間的整理(案)」等を踏まえ、基準地震動の見直しを実施した。
- ◆ その後、国の委員会等における審議を踏まえて地震動の再評価を行い、8月31日に基準地震動の見直し(追加)を国の委員会においてご説明した。
- ◆ 見直した基準地震動 S_s に対する主要施設の耐震安全性の評価を行い、耐震安全性が確保されていることを確認。順次、国の委員会においてご説明している。
- ◆ 今後も引き続き、国の委員会および福井県原子力安全専門委員会での審議に真摯に対応していく。
- ◆ また、耐震安全性評価と並行して進めている耐震裕度向上工事についても着実に取り組んでいく。

各フロアの地震波(右図の場合加速度)



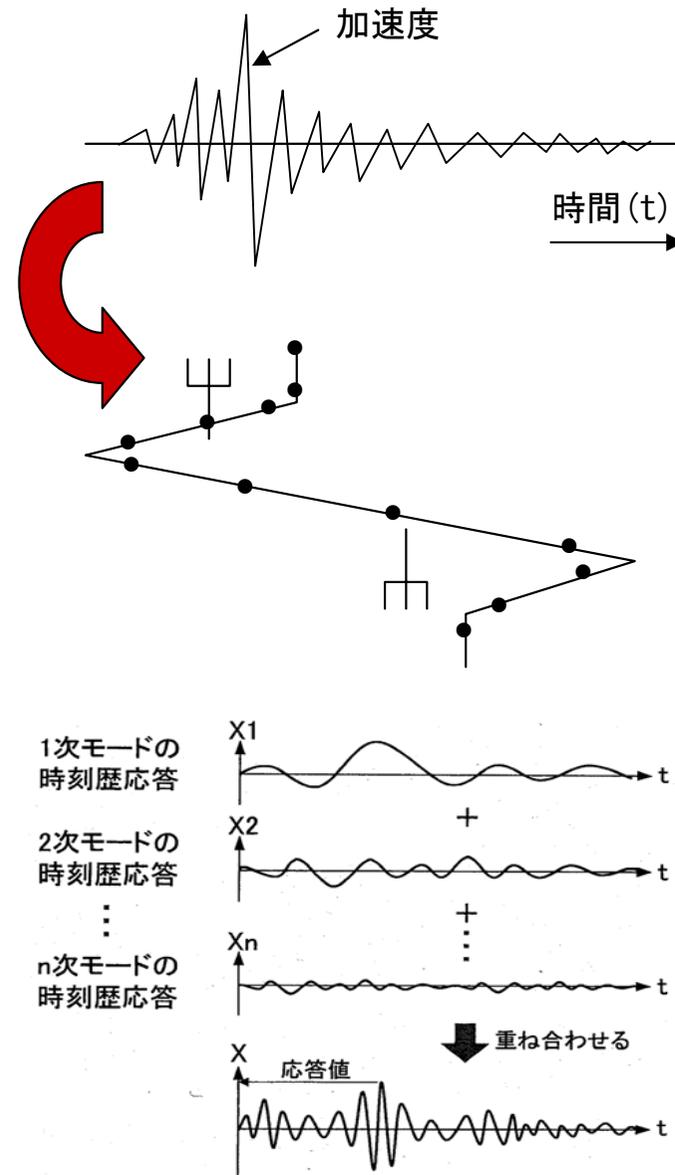
直接、解析条件として使用
(解析モデルの質点に入力)



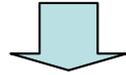
各時刻での応答を算出
(時々刻々の振動モードに対する応答)



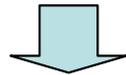
各振動モードでの応答を重ね合わせ、
最大の応答から荷重または応力を算出



各フロアの地震波



各フロアの床応答スペクトルの算定



床応答スペクトルにより機器・配管の設置レベルでの固有周期(1次、2次……)における**最大の応答(加速度)**を算定

- 1次固有周期 T_1 → 加速度 α_1
- 2次固有周期 T_2 → 加速度 α_2
- 3次固有周期 T_3 → 加速度 α_3

.....



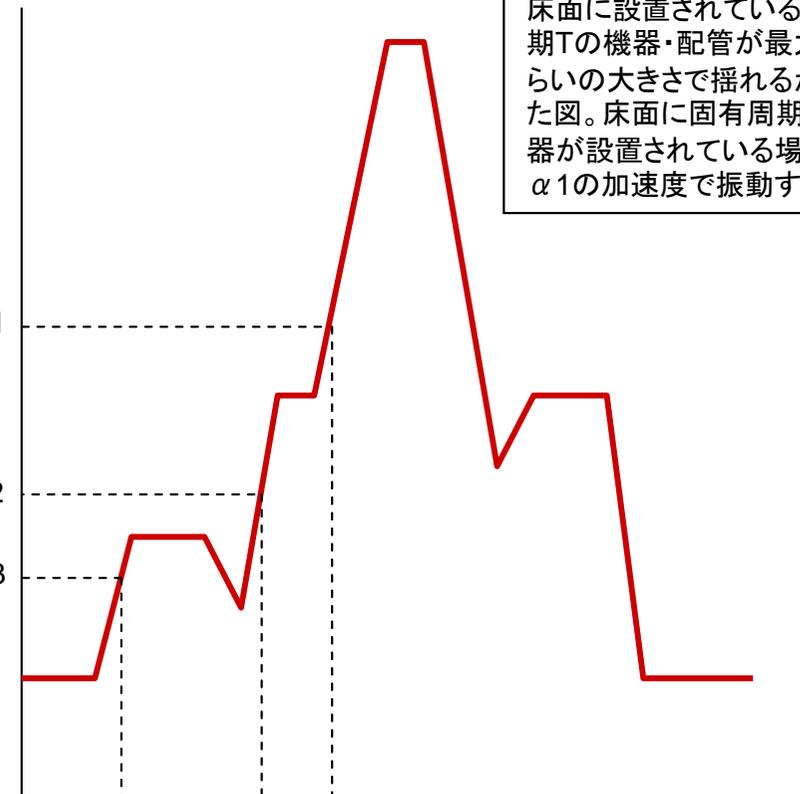
それぞれの固有周期での最大の応答から発生する荷重または応力を計算

$$\text{荷重または応力} = \sqrt{(\text{1次の応答による荷重または応力})^2 + (\text{2次の応答による荷重または応力})^2 \cdot \dots}$$

床応答スペクトル

応答(加速度)

α_1
 α_2
 α_3



床応答スペクトル:
床面に設置されている固有周期 T の機器・配管が最大どれくらいの大きさで揺れるかを示した図。床面に固有周期 T_1 の機器が設置されている場合、最大 α_1 の加速度で振動する。

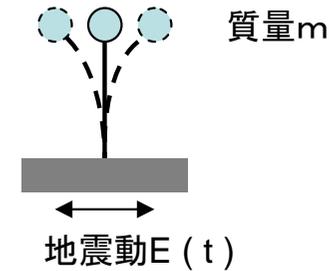
T_3 T_2 T_1

周期 (T)

1質点系の地震による運動方程式は

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = -m \frac{d^2E}{dt^2}$$

減衰項:
速度に比例した減衰
剛性項:
変位に比例した反力
地震力項:
質量×地震加速度



$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad h = \frac{c}{2\sqrt{mk}} \quad \text{とおけば上式は}$$

(固有円振動数) (減衰定数)

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2h\omega \frac{dx}{dt} + \omega^2x = - \frac{d^2E}{dt^2}$$

地震加速度 $\frac{d^2E}{dt^2}$ の時刻暦データがあれば、上式に入れ地震による固有円振動数 ω を有した質点

の運動を求めることができる。設計で必要となるのは、質点の運動の時間変化でなくその最大値である。そこで、固有円振動数を変化させて、質点の運動の最大値(例えば加速度)を求めていけば、横軸に振動周期 $T (= 2\pi / \omega)$ 、縦軸に応答加速度の最大を描いた図を得ることができる。これが、応答スペクトル図であり、振動周期 T の機器がどの程度揺れるか知ることができる。

多質点系の地震による運動方程式は

$$[M] \frac{d^2 \{x\}}{dt^2} + [C] \frac{d \{x\}}{dt} + [K] \{x\} = -[M] \frac{d^2 E}{dt^2} \{U\}$$

[M] : 質量マトリクス [C] : 減衰係数マトリクス [K] : 剛性マトリクス
 {x} : 変位ベクトル {U} : 単位ベクトル E : 入力地震動

変位ベクトル{x}を振動型に定数を掛けたものの和 $\{x\} = \sum \psi_n \{X_n\}$ で表し、振動型の直交性を考慮すると、上式は以下のような簡単な式で表せる。

$$M_n \frac{d^2 \psi_n}{dt^2} + C_n \frac{d \psi_n}{dt} + K_n \psi_n = - \overline{M}_n \frac{d^2 E}{dt^2}$$

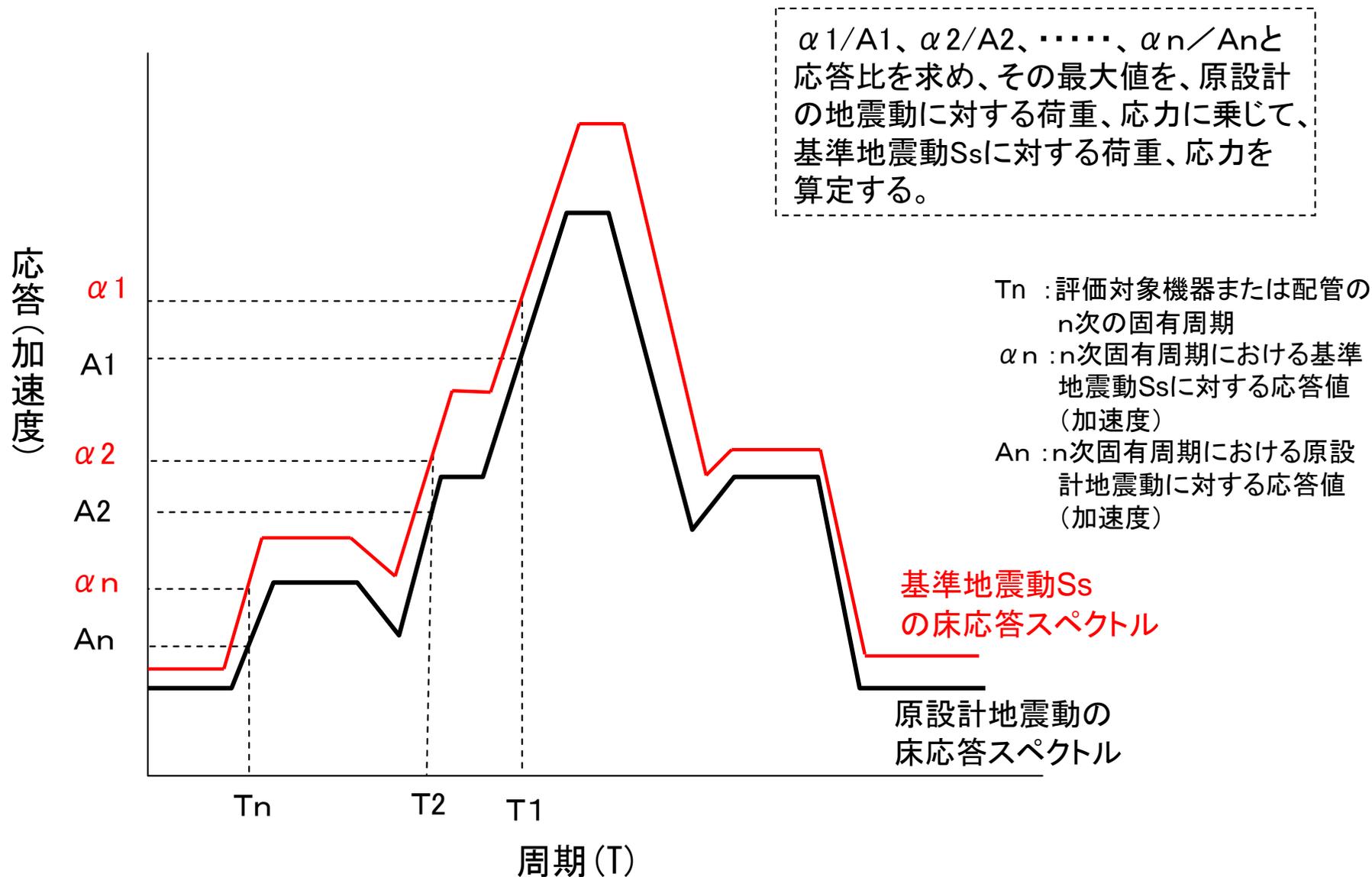
この式を1質点系の運動方程式と同じ形で表せば

$$\frac{d^2 \psi_n}{dt^2} + 2h_n \omega_n \frac{d \psi_n}{dt} + \omega_n^2 \psi_n = - \beta_n \frac{d^2 E}{dt^2}$$

↑
刺激係数

ψ_n の地震時の最大応答は1質点系で得られている応答スペクトルを β_n 倍すれば求められることになる。しかし、1次、2次、……すべての次数の応答値同時刻に最大値になることは極めてまれなため、スペクトルモーダル解析では和の最大値を各次数の最大値の2乗和平均(SRSS)から求める。

応答倍率法は、発生値が評価基準値を超えないことを効率的に評価することを目的とした評価手法。応答倍率法を用いる場合は、各モードごとに求めた応答比の最大値を応答比として用い、保守性を持たせている。



■複数の固有モードが存在する場合

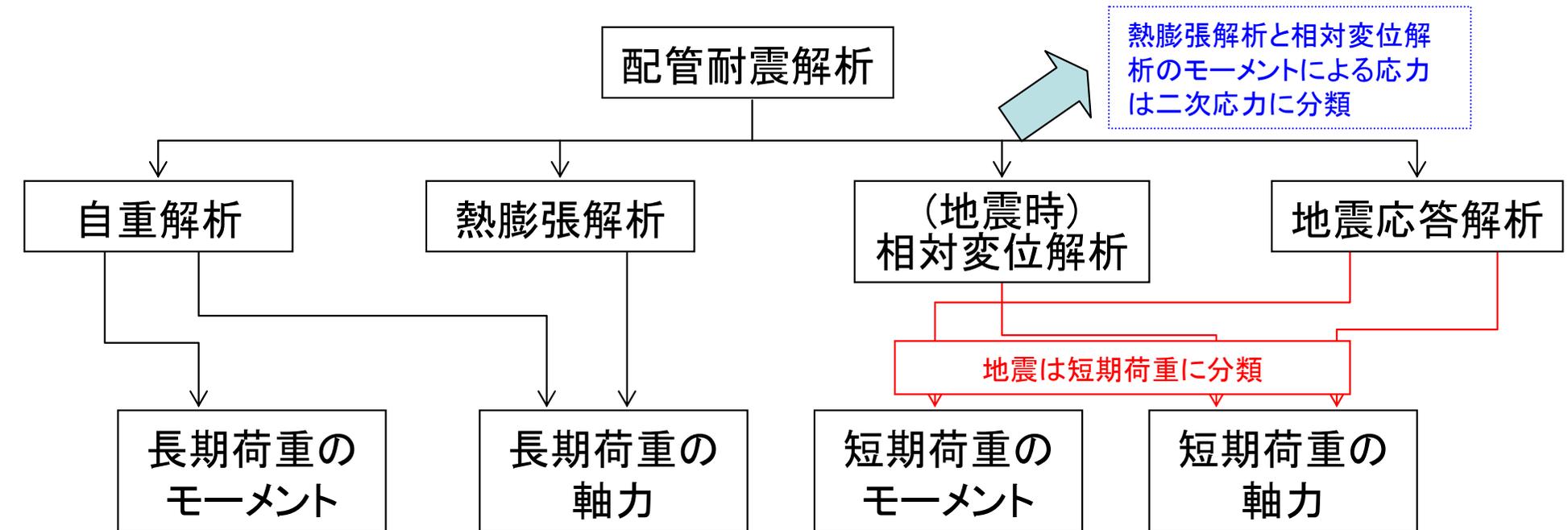
- ・ 複数の振動モードが存在する配管等では、振動モード毎に応答のしやすさが異なるが（スペクトルモーダル解析法では、刺激係数により表される。刺激係数の小さいモードは応答がでにくい。）刺激係数の大きさを考慮せずに、最大の応答比を全てのモードに乗じて算定
- ・ 配管等の最大応力点の評価は、その部位の振動モードにおける応答比が影響するが、
 全て応答比の最大値を使用

* 応答比=加速度比

複数の固有モードが存在する場合の応答比算出例

モード (次数)	固有周期(s)	刺激係数			加速度				応答比			
		水平		鉛直	原設計		耐震安全性評価 基準地震動Ss		評価1 β	評価1' β'	評価2, 2'	
		X方向	Z方向		水平 C_{HD}	鉛直 C_{VD}	水平 C_{HN}	鉛直 C_{VN}			β_H	β_V
1	0.079	0.039	0.841	0.470	2.52	0.29	2.744	1.789	1.382	1.291	1.089	6.168
2	0.072	0.105	0.760	0.576	2.03	0.29	2.302	1.719	1.481	1.401	1.134	5.928
3	0.066	1.064	0.213	0.262	1.73	0.29	2.125	2.374	1.848	1.816	1.228	8.187
4	0.063	0.274	0.231	0.874	1.73	0.29	1.942	2.767	1.964	1.927	1.122	9.541
5	0.060	0.118	0.508	1.008	1.70	0.29	2.095	3.025	2.126	2.134	1.232	10.432
6	0.057	0.591	0.076	0.075	1.53	0.29	2.171	3.080	2.309	2.420	1.419	10.621
7	0.056	0.837	0.042	0.063	1.45	0.29	2.171	3.080	2.381	2.548	1.497	10.621
8	0.052	0.069	0.542	0.108	1.35	0.29	2.171	3.080	2.475	2.729	1.608	10.621
9	0.050	0.043	0.782	0.039	1.34	0.29	2.171	3.080	2.485	2.748	1.620	10.621
最大値	-				-	-	-	-	2.485	2.748	1.620	10.621

↑
 応答比は最大値を使用



応力評価式

$$\frac{B_1 P D_0}{200t} + \frac{B_2 D_0}{2I} (M_i + M_i^*) + \frac{|Fa + Fa^*|}{A} \leq 2K_s S_m$$

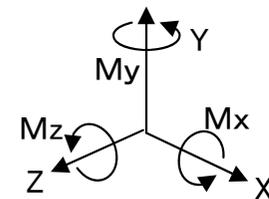
内圧による
応力

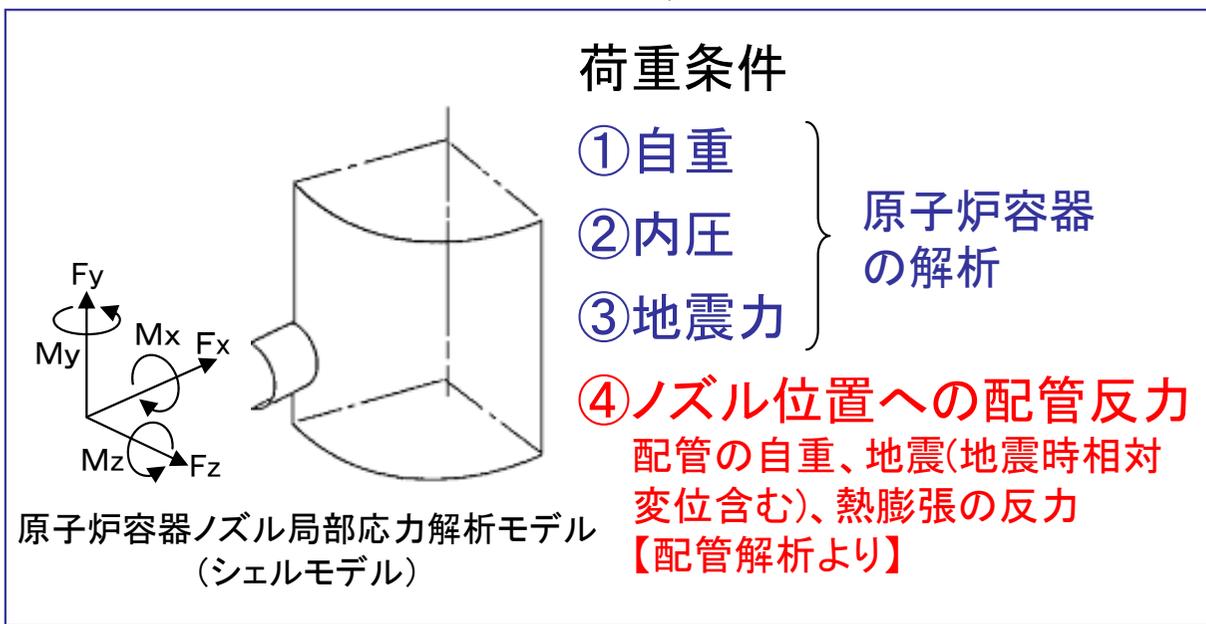
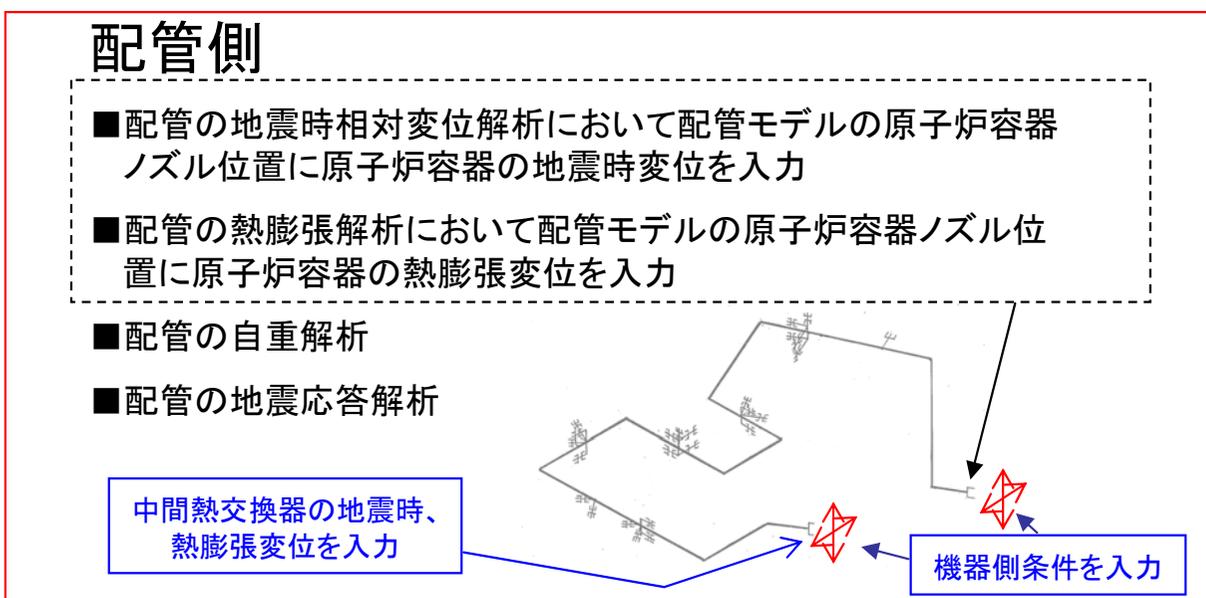
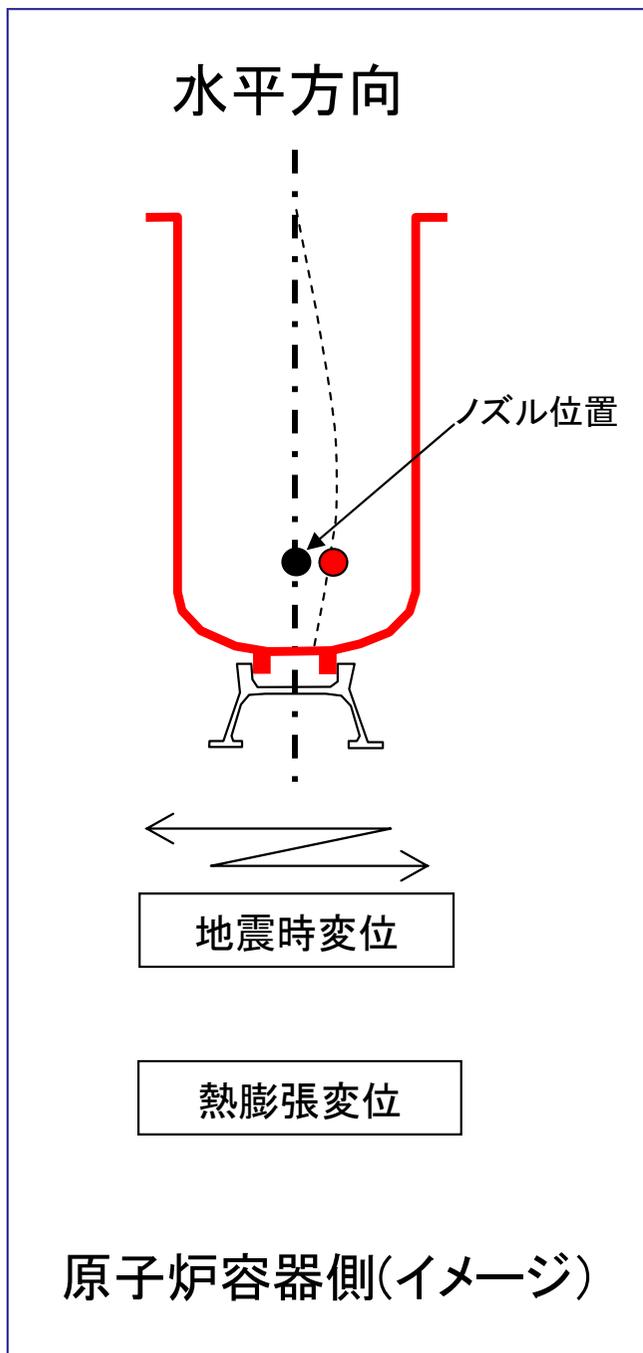
自重、地震のモーメントに
よる応力

自重、地震、熱膨張、相
対変位の軸力による応力

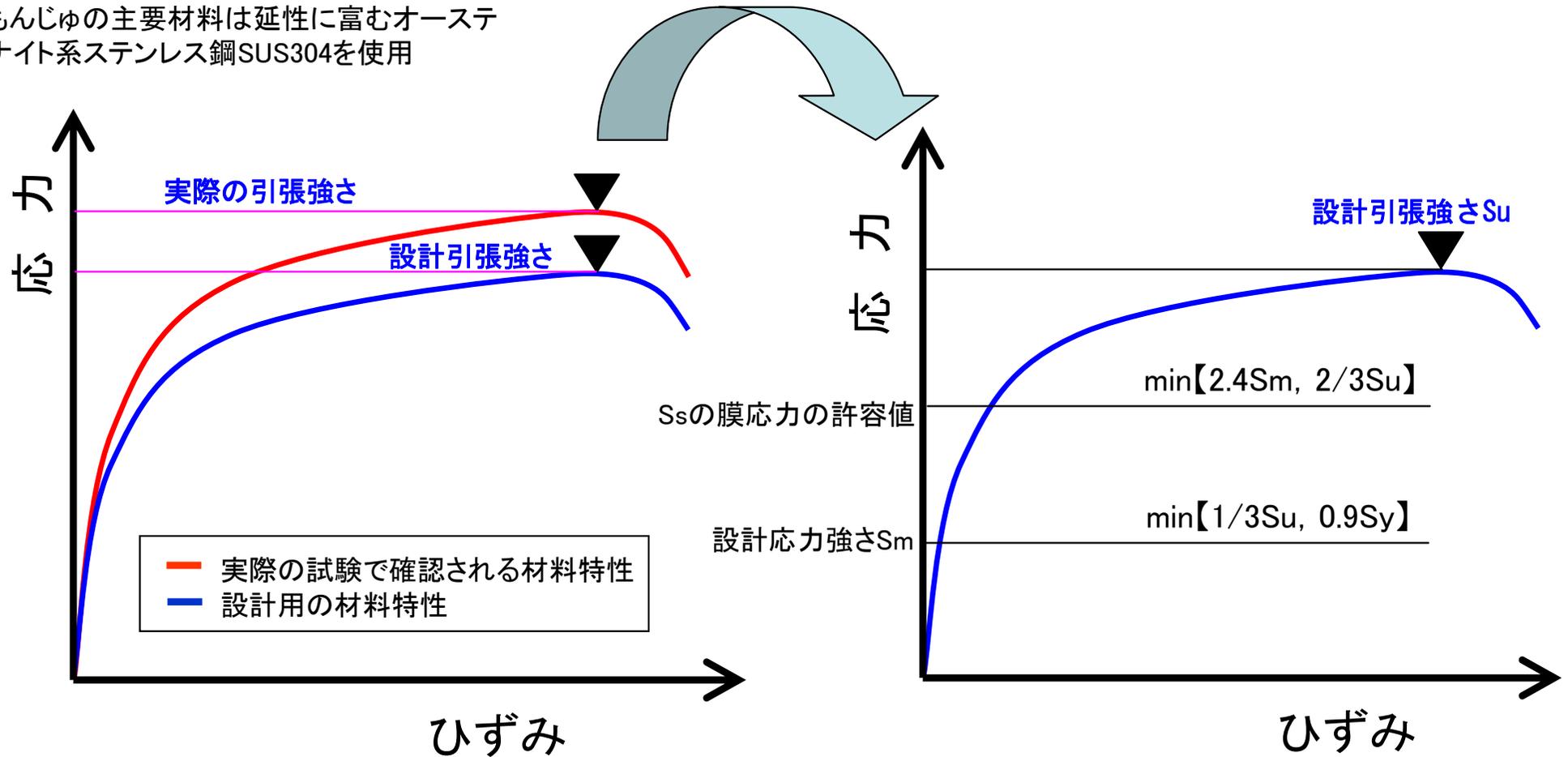
評価基準値 IV_{AS}

$$M_i = \sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2}$$





もんじゅの主要材料は延性に富むオーステナイト系ステンレス鋼SUS304を使用



もんじゅ主要材料SUS304(オーステナイト系ステンレス鋼)のクラス1容器(第1種機器)の場合

材料の許容応力は保守的に設定されている

- 設計の引張強さSuを決めるための材料特性は実際の材料特性よりも保守的に設定
- 基準地震動Ssにおける許容値は保守的な材料特性のもとで、裕度を持って設定

注: $\min[1/3S_u, 0.9S_y]$ とは1/3Suと0.9Syいずれか小さい方の値のことを意味する